



# Extraction de sources lumineuses en Rendu Basé Image (IBR)

Bruno Mercier

## ► To cite this version:

| Bruno Mercier. Extraction de sources lumineuses en Rendu Basé Image (IBR). 2002. hal-00350568

**HAL Id: hal-00350568**

**<https://hal.science/hal-00350568>**

Submitted on 7 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DEA T3IA Traitement de l'Information : Informatique, Images, Automatique

# Extraction de sources lumineuses en rendu basé-image

Bruno MERCIER

Mémoire de Stage effectué  
sous la direction de Daniel MENEVEAUX et Gilles SUBRENAT

au Laboratoire IRCOM-SIC  
Université de POITIERS, UFR SFA

**Juillet 2002**



Je remercie l'équipe IRCOM-SIC de m'avoir accueilli pendant ce stage de DEA.

Je remercie également Antoine Bergey pour sa bonne humeur et son sens du contact.

Je remercie Gilles Subrenat, mon encadrant de stage, pour ses conseils et sa lecture attentive de ce rapport.

Je remercie plus particulièrement Daniel Meneveaux, mon second encadrant de stage, pour sa disponibilité. Il m'a toujours guidé, aidé et soutenu au cours de ce stage. Son optimisme m'a redonné confiance dans les moments pénibles et m'a donné l'envie de faire de la recherche.

Enfin j'exprime ma gratitude envers ma famille et mes amis qui me soutiennent et me supportent au quotidien.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1 Etat de l'art</b>	<b>9</b>
1.1 Modèles et méthodes existantes en Rendu Basé Image . . . . .	9
1.1.1 Origines . . . . .	9
1.1.2 Fonction plénoptique . . . . .	9
1.1.3 Plenoptic Modeling . . . . .	10
1.2 Les lumigraphes . . . . .	11
1.3 Description de l'existant . . . . .	14
1.3.1 Reconstruction de la géométrie d'un lumigraphe . . . . .	14
1.3.2 Estimation de la normale de la surface . . . . .	15
1.3.3 Classification des voxels . . . . .	15
1.4 Problématique . . . . .	16
1.5 Techniques existantes d'extraction de sources . . . . .	16
1.5.1 Source directionnelle pour une région . . . . .	17
1.5.2 Source directionnelle pour $n$ régions . . . . .	17
1.5.3 Source ponctuelle . . . . .	17
1.5.4 Plusieurs sources ponctuelles . . . . .	17
<b>2 Travail réalisé</b>	<b>19</b>
2.1 Données d'entrée du programme . . . . .	19
2.2 Sources de lumière et propriétés de réflectance . . . . .	20
2.2.1 Les sources lumineuses . . . . .	20
2.2.2 Les calculs d'illumination . . . . .	21
2.2.3 Nos choix . . . . .	24
2.3 Détection d'une source : analyses parallèles . . . . .	25
2.3.1 Source ponctuelle - surface diffuse . . . . .	26
2.3.2 Source ponctuelle - surface mixte (diffuse et spéculaire) . . . . .	40
2.3.3 Source directionnelle - surface diffuse . . . . .	48
2.3.4 Source directionnelle - surface mixte (diffuse et spéculaire) . . . . .	49
2.4 Estimation de l'erreur . . . . .	50
2.4.1 Surfaces diffuses . . . . .	50
2.4.2 Surfaces mixtes (diffuses et spéculaires) . . . . .	51
2.5 Algorithme de détection . . . . .	52
2.5.1 Algorithme "brut" . . . . .	52
2.5.2 Utilisation du type de surface . . . . .	53
<b>3 Expérimentation</b>	<b>57</b>
3.1 Création d'un octree de tests . . . . .	57
3.2 Initialisation des données du programme . . . . .	58
3.3 Estimation de l'erreur des distances . . . . .	59
3.4 Quelques résultats de la détection . . . . .	59

<b>4 Perspectives, mise en oeuvre, discussion</b>	<b>65</b>
<b>Conclusion</b>	<b>67</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>69</b>

# Introduction

Les techniques classiques en informatique graphique produisent une image à partir d'un environnement virtuel décrit sous forme de primitives géométriques. De manière générale, ces primitives correspondent à des polygones, des plans, des sphères, ou encore des surfaces paramétriques (surfaces de béziers, surfaces splines, etc.). Plus la description des objets de la scène<sup>1</sup> est précise, plus le nombre de primitives géométriques est important.

Le mécanisme de synthèse d'image nécessite de plonger un appareil photo virtuel à l'intérieur de l'environnement géométrique. Cet appareil est caractérisé par un centre de projection (souvent assimilé à l'oeil d'un observateur), ainsi qu'une grille de pixels (correspondant aux pixels de l'image ou de l'écran).

La synthèse d'une image est réalisée par projection des objets de la scène sur la grille de pixels, en prenant en compte les phénomènes liés aux transferts de lumière à l'intérieur de la scène. La difficulté du problème réside dans les opérations de simulations d'éclairage, et en particulier pour des environnements complexes car le nombre important de primitives géométriques nécessite des ressources importantes en terme de temps de calcul et de stockage mémoire.

Depuis quelques années, de nouvelles méthodes dites de *Rendu Basé-Image* (RBI) permettent de visualiser des objets uniquement à partir d'images. Ces méthodes impliquent plusieurs domaines de recherche différents tels que la vision, le traitement ou l'analyse d'images et le rendu réaliste. L'intérêt de ces techniques est multiple. Ainsi, à l'aide de photographies :

- la réduction très importante du nombre de primitives géométriques provoque une nette accélération des calculs,
- l'utilisation d'objets réels permet d'accroître le réalisme de l'image synthétisée.

Cependant, l'utilisation d'images impose certaines restrictions :

- la résolution fixe des photographies ne permet pas de travailler de manière trop proche des objets,
- les images doivent être prises dans des conditions d'acquisition très précises (calibrage de la caméra, éclairage constant et objet statique pendant toute la durée d'acquisition des photographies),
- la scène est décrite de manière statique puisqu'elle n'est composée que d'objets photographiés,
- le nombre d'images utilisées est souvent très important et le problème de place mémoire doit être géré. A titre d'exemple, lors de ce stage, chaque objet utilisé est représenté par une dizaine de milliers de photographies de résolution 256 \* 256.

Notre travail a pour objectif, à plus long terme, d'intégrer des objets basés-image à l'intérieur d'environnements virtuels. Un objet basé-image est une représentation d'un objet par un ensemble de photographies (la définition d'un tel objet est différente des représentations classiques par une géométrie).

---

<sup>1</sup>autre désignation de l'environnement virtuel



L'intégration permet d'accroître le réalisme d'un environnement virtuel (composé de primitives géométriques), d'obtenir un modèle géométrique d'un objet basé-image, et en même temps, d'élargir le champ d'application des techniques basées-image en les intégrant dans des environnements virtuels.

Cependant, l'intégration d'objets basés-image dans des environnements géométriques pose de nouveaux problèmes :

- lors de l'utilisation de plusieurs objets basés-image, certains objets peuvent être cachés par d'autres. La reconstruction d'une géométrie pour chaque objet permet de supprimer les problèmes de profondeur,
- les ombres projetées doivent être prises en compte sur les objets basés-image et les autres primitives de la scène,
- l'éclairage présent lors de l'acquisition d'un objet basé-image ne correspond pas à celui de l'environnement virtuel. L'intégration d'objets basés-image dans un environnement doit rester réaliste et ne faire apparaître aucune différence d'éclairage.

Tous ces problèmes apparaissent lors de la synthèse d'une nouvelle image de l'environnement : les caractéristiques de ces objets basés-image doivent être retrouvées afin d'effectuer une simulation d'éclairage correcte sur l'environnement géométrique. Notre travail est principalement axé sur l'obtention de ces caractéristiques. Ainsi, nous devons disposer :

- d'une géométrie de chaque objet basé-image,
- de la réflectance de la surface de chaque objet basé-image, i.e. d'une estimation du comportement de la lumière réfléchi par la surface de cet objet,
- d'une estimation de l'éclairage initial utilisé lors de l'acquisition de chaque objet basé-image.

Les objets basés-image manipulés sont représentés par des structures appelées *lightfields*, proposées en 1996 par des chercheurs de l'Université de Stanford. Ce modèle de représentation d'objets est développé parallèlement par l'équipe de Microsoft Research, sous le nom de *lumigraphes*. Chaque lumigraphe est défini par un ensemble de photographies prises tout autour de l'objet réel, en différents points de vue fixés.

Une première étude est réalisée par mes encadrants de stage en supposant connues les sources de lumières dans les objets basés-image. Un prétraitement est effectué à partir du lumigraphe. Un algorithme de reconstruction par sculpture est utilisé pour obtenir une représentation géométrique grossière d'un lumigraphe, sous forme d'un ensemble de voxels. Les voxels de la surface de l'objet, pour lesquels la lumière est réfléchi de manière similaire, sont regroupés. Une estimation de la réflectance de ces voxels est réalisée en utilisant les caractéristiques connues des sources lumineuses.

L'objectif de ce stage est de déterminer, de manière automatique, les caractéristiques des sources de lumière ainsi que les paramètres photométriques d'un lumigraphe.

La détection de ces sources lumineuses permet l'utilisation de lumigraphes dont les sources lumineuses sont initialement inconnues pour estimer la réflectance de la surface. Cela permet d'intégrer le lumigraphe dans un environnement géométrique, d'utiliser l'éclairage de cet environnement et d'obtenir une nouvelle illumination du lumigraphe lors de la visualisation.

Ce travail de détection utilise la géométrie estimée du lumigraphe et la classification des voxels en complément des informations fournies par les photographies de l'objet.

La première partie de ce rapport présente une recherche bibliographique concernant le Rendu Basé-Image. Nous discutons également des différents modèles d'illumination afin d'aborder la

détection des sources lumineuses présentes lors de l'acquisition d'un lumigraphe. Avec cette connaissance, nous pouvons déterminer les types de sources à extraire des lumigraphes et activer la phase de détection d'une première source lumineuse. Cette détection de source est suivie par une étape d'évaluation d'erreur, permettant d'affiner les résultats obtenus précédemment. Enfin, nous évaluons le bilan de ce stage, l'état d'avancement de nos travaux et les perspectives d'évolution de ce projet.



# Chapitre 1

## Etat de l'art

### 1.1 Modèles et méthodes existantes en Rendu Basé Image

Le *rendu basé-image* est une technique de synthèse d'images à partir d'un environnement représenté par des photographies. Le principe est de produire une nouvelle image de l'environnement, prise depuis un point de vue précis, en utilisant des images de référence représentant ce même environnement photographié sous divers angles de vue.

L'utilisation d'images pour représenter un environnement réduit les temps de calcul pour la représentation d'environnement complexe (constitué d'une multitude d'objets). En effet, ce modèle de représentation ne dépend pas de la complexité géométrique de la scène (elle est représentée par un nombre fixe d'images), contrairement au processus classique de synthèse d'images où la scène est définie par des polygones.

L'utilisation de photographies permet également d'accroître le réalisme des nouvelles images synthétisées.

#### 1.1.1 Origines

A l'origine, les images sont utilisées dans l'environnement sous forme de textures de manière à augmenter le réalisme des images synthétisées. L'environnement virtuel est décrit par une représentation géométrique (par des polygones) et lors de la synthèse d'une image, des photographies sont placées sur les polygones pour obtenir un rendu final plus réaliste. Cette méthode est appelée "*plaquage de textures*". Malheureusement, elle réduit peu les temps de calcul. En effet, la géométrie de la scène est simplifiée, les détails des objets sont représentés par des textures, mais la représentation géométrique de l'environnement est indispensable pour la synthèse d'une image.

Depuis une dizaine d'années, des méthodes basées-image permettent de visualiser un environnement uniquement à partir de photographies. Pour générer de nouvelles images réalistes, l'environnement doit être représenté par suffisamment de photographies. Une représentation "parfaite" de l'environnement correspond à un échantillonnage de la lumière réfléchi par cet environnement dans toutes les directions de réflexion.

#### 1.1.2 Fonction plénoptique

La *fonction plénoptique*, définie par Adelson et Bergen [1], décrit la luminance perçue par tout point de vue de l'observateur, provenant de toute direction. Cette fonction est exprimée par :

$$p = P(V_x, V_y, V_z, \theta, \phi, \lambda, t)$$

Les paramètres de la fonction plénoptique sont définis sur la figure 1.1.

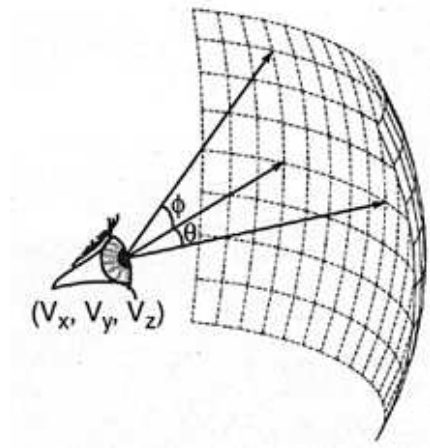


FIG. 1.1 – Paramètres représentant une direction perçue par l’œil. La fonction plénoptique utilise ces paramètres.  $(V_x, V_y, V_z)$  correspondent aux coordonnées du point de vue.  $(\theta, \phi)$  représentent la direction d’incidence de la lumière

Deux paramètres ne sont pas représentés sur la figure :  $\lambda$  correspondant à la longueur d’onde de la lumière, et  $t$  faisant référence au temps :

- la longueur d’onde est souvent représentée par trois composantes chromatiques. Par exemple, le système de représentation des couleurs sous forme RVB utilise les composantes rouge, vert et bleu,
- le facteur temps  $t$  est rarement représenté dans les modèles de Rendu Basé Image. Il est très difficile d’obtenir des images représentant un environnement non stationnaire (sachant qu’un instant donné de l’environnement est représenté par plusieurs images). L’acquisition d’un tel environnement est principalement effectuée par de multiples caméras, donnant une représentation de la scène par des séquences vidéos.

Ainsi, la connaissance de la fonction plénoptique pour un environnement permet de générer des images depuis tout point de vue.

Une photographie, utilisée dans la représentation d’un environnement, est un échantillon discret de la fonction plénoptique en un point  $(V_x, V_y, V_z)$  particulier, avec un angle de vue donné (intervalle de valeurs  $\theta$  et  $\phi$ ). La composante temps ( $t$ ) est fixe dans une photographie, et de manière générale, l’environnement est statique, représenté par un ensemble d’images à un temps  $t$  fixé.

L’utilisation de suffisamment d’images pour représenter l’environnement permet de reconstituer la fonction plénoptique.

Les systèmes actuellement utilisés de Rendu Basé-Image nécessitent une représentation de la fonction plénoptique par de multiples photographies.

### 1.1.3 Plenoptic Modeling

Le *plenoptic modeling*, défini par McMillan et Bishop dans [45], utilise un ensemble de photographies pour décrire la scène, représentant un ensemble d’échantillons discrets de la fonction plénoptique pour un instant  $t$  fixé. Les photographies sont fusionnées pour construire des images cylindriques, représentant une vue panoramique de la scène sur 360 degrés. La figure 1.2 illustre l’acquisition d’une image cylindrique.



FIG. 1.2 – Système d'acquisition d'une image cylindrique, utilisée par le Plenoptic Modeling

Puis, à partir de deux images cylindriques définies précédemment (images de référence, représentant la scène selon deux points de vue différents), une nouvelle image cylindrique peut être construite, représentant la scène observée depuis le point de vue choisi. Cette construction de nouvelle vue de l'environnement est illustrée sur la figure 1.3.

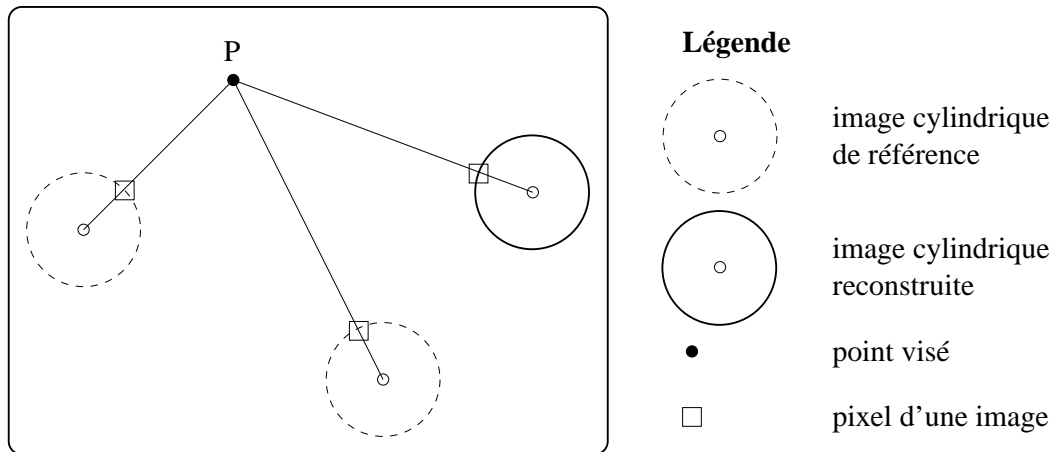


FIG. 1.3 – Une nouvelle vue panoramique de l'environnement est reconstruite. Chaque pixel de la nouvelle image est une projection d'un point  $P$  de l'environnement sur ce cylindre. Le point  $P$  est représenté par un pixel sur chaque cylindre de référence

Ce système de projection, permettant d'obtenir des nouvelles vues de l'environnement, utilise la géométrie épipolaire pour déterminer à quelle profondeur le point  $P$  (défini sur la figure 1.3) doit être choisi.

Les lumigraphes, détaillés dans la section suivante, représentent le système de rendu basé-image utilisé au cours du stage de DEA. D'autres méthodes existent, elles sont référencées dans la bibliographie.

## 1.2 Les lumigraphes

Comme le plenoptic modeling, le *lumigraphe* représente un échantillonnage discret de la fonction plénoptique à un instant donné. Le lumigraphe est souvent utilisé pour représenter un objet et non un environnement complet.

Le lumigraphe, également désigné sous le nom de *lightfield*, est proposé, en 1996, par l'université de Stanford et Microsoft Research [40]. Lorsqu'il représente un objet, il est défini par un ensemble de photographies prises tout autour de l'objet.

L'acquisition de l'objet est effectuée dans des conditions strictes. La plupart du temps, elle est réalisée dans un laboratoire d'acquisition, voir figure 1.4 : pièce entourée de rideaux noirs afin d'éviter toute interaction lumineuse entre l'objet et le décor. L'objet doit être fixe afin d'obtenir plusieurs clichés du même objet. De plus, l'éclairage de la pièce est constant, il ne varie pas pendant toute la phase d'acquisition.



FIG. 1.4 – Système d'acquisition d'un lightfield. L'objet est placé au centre, l'éclairage de la pièce est constant. La caméra se déplace autour de l'objet pour réaliser l'acquisition

Chaque photographie est prise après un calibrage précis de l'appareil photographique. Une paire de plans parallèles (plans  $(u, v)$  et  $(s, t)$ ), appelée *slab*, est utilisée pour ce calibrage : voir figure 1.5. Le plan  $(u, v)$  est utilisé pour positionner l'appareil, il est représenté par une grille régulière de positions ( $u$  et  $v$  sont les coordonnées du centre de projection de l'appareil). Le plan  $(s, t)$ , centré sur l'objet, représente une photographie de l'objet (grille régulière de pixels, dont les coordonnées sont  $s$  et  $t$ ). Toutes les photographies prises depuis le plan  $(u, v)$  sont cadrées afin de toujours obtenir une image du plan  $(s, t)$ .

Pour un slab donné, la position de l'appareil photo varie sur le plan  $(u, v)$ , elle prend généralement  $16 * 16$  ou  $32 * 32$  positions différentes. Chaque photographie de l'objet prise depuis le plan  $(u, v)$  est représentée par la grille régulière du plan  $(s, t)$ , généralement de taille  $128 * 128$  ou  $256 * 256$ . Une interprétation plus concrète des plans  $(u, v)$  et  $(s, t)$  est donnée sur la figure 1.6.

Une représentation complète de l'objet ne peut être obtenue avec un seul slab. Six slabs peuvent être utilisés, tels que le plan  $(u, v)$  de chaque slab coïncide avec une face d'un cube englobant l'objet. La figure 1.7 illustre l'utilisation de quatres slabs.

Ainsi, un lumigraphe est souvent représenté par six slabs, soit environ  $6 * 32 * 32 \simeq 6000$  images. Chaque pixel d'une image est codé sous le format RVB (rouge, vert, bleu) et représente la luminance réfléchiée par un point de la surface de l'objet dans une direction définie par les coordonnées des plans  $(u, v)$  et  $(s, t)$ . La luminance réfléchiée doit dépendre de la longueur d'onde mais seulement trois composantes chromatiques sont connues pour un pixel. Un pixel correspond donc à trois luminances réfléchiées (une par couleur).

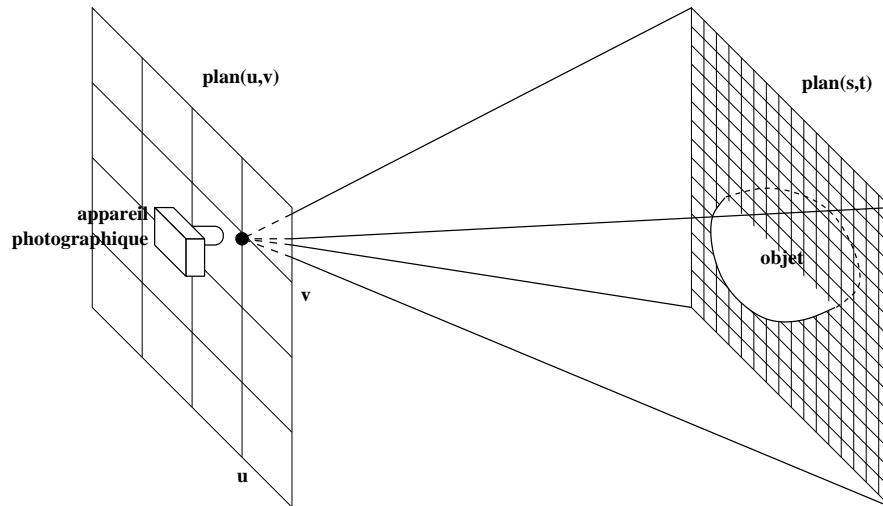


FIG. 1.5 – Slab ( $uvst$ ) utilisé pour faciliter l'acquisition d'un lightfield. L'appareil est déplacé sur le plan  $(u, v)$  pour photographier l'objet selon des points de vue différents. Chaque photographie prise est représentée sur le plan  $(s, t)$  par une grille régulière de pixels

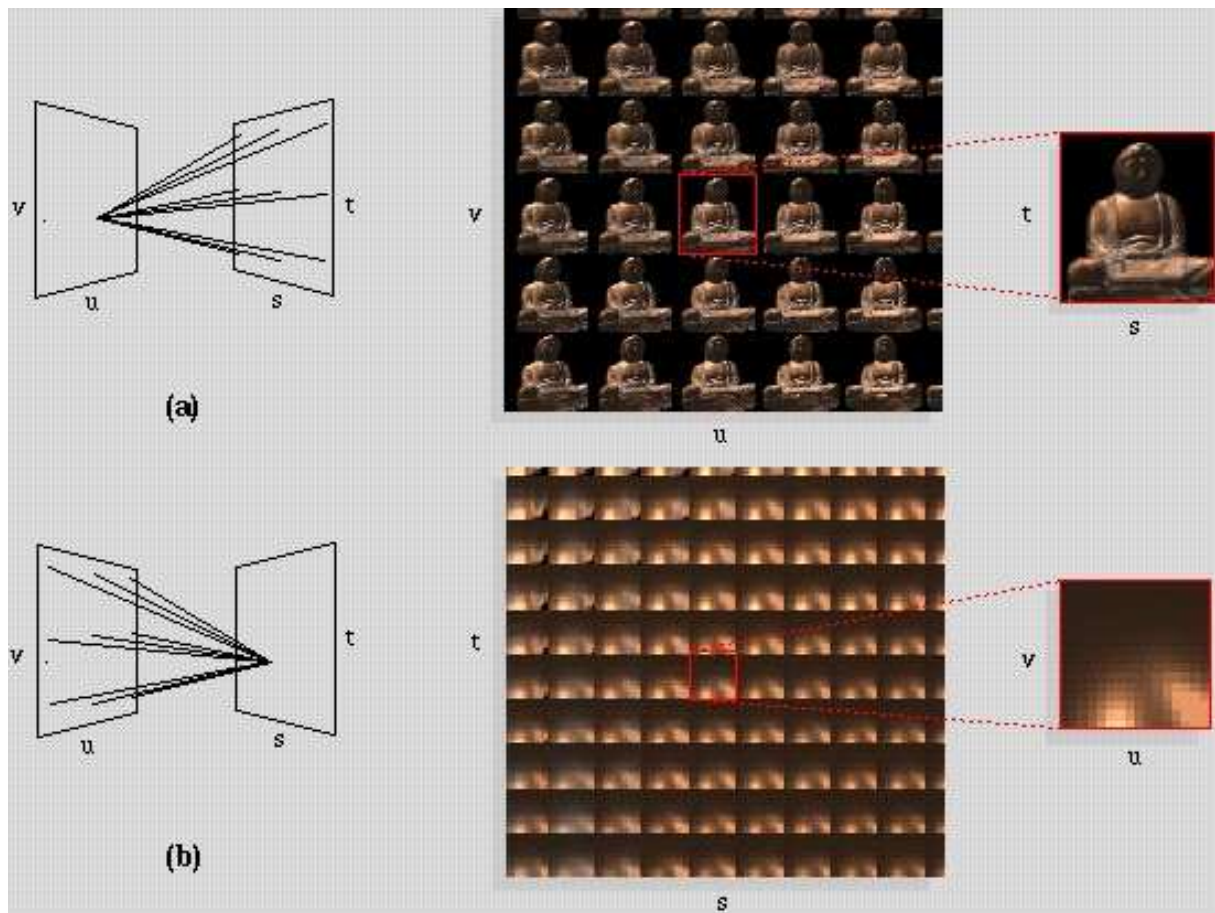


FIG. 1.6 – Sur la figure (a), toute position sur le plan  $(u, v)$  est associée à une photographie de l'objet (le plan  $(s, t)$  complet). Sur la figure (b), toute position sur le plan  $(s, t)$  est associée à un ensemble de directions (provenant du plan  $(u, v)$  complet) permettant d'obtenir la luminance renvoyée dans chacune de ces directions



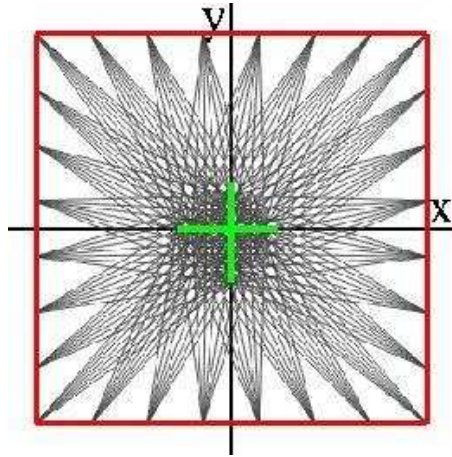


FIG. 1.7 – Quatres slabs sont utilisés pour l'acquisition de l'objet

Avec des images de résolution  $256 \times 256$ , un lumigraphe est composé de 1.2 milliards de luminances réfléchies par l'objet dans toutes les directions, engendrant un volume de données à stocker très important.

### 1.3 Description de l'existant

Des travaux sur les lightfields ont été réalisés au laboratoire IRCOM-SIC par D. Meneveaux et G. Subrenat [46]. Ces travaux ont permis d'intégrer des lightfields dans un environnement virtuel en utilisant des sources lumineuses virtuelles pendant l'acquisition de chaque lumigraphe : toutes les caractéristiques des sources de lumière sont connues a priori.

La reconstruction de la géométrie d'un lumigraphe est la première étape de l'intégration d'un lumigraphe dans un environnement géométrique. Cette géométrie permet de positionner le lumigraphe dans l'environnement, de détecter les surfaces visibles et cachées des objets lors de la synthèse d'une image de ce nouvel environnement.

La géométrie est également utilisée pour obtenir le vecteur normal à la surface de l'objet. Ce vecteur normal, associé aux caractéristiques connues des sources lumineuses, permet ensuite d'estimer une fonction de réflectance bidirectionnelle (BRDF) pour toute la surface de l'objet.

Les estimations de la géométrie, de la normale et de la BRDF sont ensuite utilisées par un algorithme de lancer de rayons, générant des images de l'environnement (contenant le lumigraphe) : voir figure 1.8

#### 1.3.1 Reconstruction de la géométrie d'un lumigraphe

La géométrie d'un lumigraphe est obtenue en utilisant une technique proposée par R. Szeliski [59]. L'algorithme utilise un ensemble d'images prises tout autour de l'objet pour reconstruire un octree. Un octree est une structure de données représentant un voxel, il peut être divisé en 8 octree (eux-mêmes éventuellement subdivisés en 8, et ainsi de suite) pour obtenir une géométrie plus détaillée de l'objet.

En début d'algorithme, l'objet est représenté par un octree principal (boîte englobante de l'objet). Chaque image du lumigraphe est utilisée pour sculpter le profil de l'objet dans l'octree. Pour une image, chaque voxel de l'octree est classé suivant s'il représente un voxel situé à l'intérieur



FIG. 1.8 – Exemples d'intégration d'un lumigraphe (dont les sources lumineuses sont connues) dans un environnement virtuel

de l'objet représenté sur l'image, à l'extérieur ou à cheval entre l'objet et le fond de l'image (représenté par la couleur noire).

Divers marqueurs sont utilisés, stockés dans chaque voxel de l'octree, pour représenter la classification :

- si un voxel est classé en dehors de l'objet pour une image, alors ce voxel est définitivement marqué *“OUT”* : ne faisant pas partie de l'objet. Son marqueur ne sera plus modifié jusqu'à la fin de l'algorithme,
- si un voxel est classé à l'intérieur de l'objet pour toutes les images du lumigraphe, alors ce voxel est définitivement marqué *“IN”* : faisant entièrement partie de l'objet. Son marqueur ne sera plus modifié jusqu'à la fin de l'algorithme,
- si un voxel représente seulement une partie de l'objet, alors ce voxel fait partie de la surface de l'objet. Si la géométrie de l'objet est assez fine (la taille du voxel est petite, de l'ordre de grandeur du pixel représenté sur un plan  $(s, t)$ ) alors ce voxel est marqué définitivement *“AMBIGU”* : représentant une partie de la surface de l'objet. Sinon, le voxel est subdivisé en 8 voxels et chacun de ces 8 voxels est à nouveau classé.

Cette reconstruction géométrique permet d'obtenir une représentation grossière de la surface de l'objet.

### 1.3.2 Estimation de la normale de la surface

Les voxels ambigus de l'octree représentent la surface de l'objet. Un vecteur normal est estimé pour chacun de ces voxels, et est stocké dans l'octree.

La hiérarchie de l'octree est utilisée pour retrouver les voxels voisins classés *“OUT”* d'un voxel ambigu, et estimer la direction de la normale du voxel ambigu. La normale du voxel ambigu est dirigée vers les voxels classés *“OUT”*. La direction de ces voxels par rapport au voxel ambigu est estimée et correspond à la normale. Cette normale est stockée dans les attributs du voxel (dans l'octree).

### 1.3.3 Classification des voxels

La BRDF n'est pas estimée pour chaque voxel de la surface mais pour un ensemble de voxels ayant des propriétés photométriques similaires, représentant une partie uniforme de la surface de l'objet.

Une classification des voxels ambigus est donc réalisée. Elle regroupe les voxels apparaissant identiques dans le lumigraphe (utilisation de l'ensemble de photographies et de la géométrie en voxels). Les critères de ressemblances sont surtout la couleur réfléchie par le voxel et la direction de réflexion de cette couleur.

La BRDF de chaque groupe de voxels est ensuite estimée en utilisant toutes les informations connues : les photographies, la géométrie de l'objet, la normale de la surface de l'objet et les caractéristiques des sources lumineuses. Cette estimation de BRDF indique la quantité de lumière réfléchie par la surface dans chaque direction de réflexion en fonction de chaque direction d'incidence (direction de la source lumineuse).

L'utilisation de plusieurs voxels permet d'avoir plusieurs directions d'incidence (une direction d'incidence par voxel) et par conséquent d'obtenir une estimation plus précise de la BRDF.

## 1.4 Problématique

L'intégration d'un lumigraphe dans un environnement est réalisée mais elle utilise les caractéristiques des sources lumineuses présentes lors de l'acquisition du lumigraphe pour estimer la fonction de réflectance bidirectionnelle de la surface de l'objet.

De manière générale, lorsqu'un lumigraphe est utilisé, les conditions d'éclairage initiales ne sont pas connues. Sans la connaissance de cet éclairage initial, la fonction de réflectance bidirectionnelle des voxels représentant le lumigraphe ne peut être estimée.

Par conséquent, le ré-éclairage du lumigraphe lors de son intégration dans un environnement, disposant d'un éclairage différent de celui du lumigraphe, n'est plus envisageable.

Pourtant, l'utilité de la BRDF n'est plus à démontrer. Sans ré-éclairage, le lumigraphe apparaît avec la même illumination dans toutes les images synthétisées : cette représentation n'est pas réaliste, elle doit être évitée.

Pour palier ce problème, nous devons retrouver les sources lumineuses initiales de chaque lumigraphe. C'est l'objectif du stage de DEA : déterminer les caractéristiques des sources lumineuses présentes lors de l'acquisition d'un lumigraphe.

La réalisation de ce travail s'appuie sur les structures de données déjà existantes : nous réutilisons la construction d'une géométrie en voxels, l'estimation de la normale de chaque voxel appartenant à la surface, ainsi que la classification de ces voxels.

## 1.5 Techniques existantes d'extraction de sources

Nous utilisons dans cette section des notions expliquées dans la section 2.2 (définition des types de sources lumineuses et des différents modèles de réflexion).

Une extraction de sources lumineuses est réalisée par E. Guillou [23] à partir d'une image calibrée d'un environnement. Cette extraction est effectuée sous certaines hypothèses :

- tous les objets de l'environnement ont un comportement de réflexion diffuse, i.e. ils réfléchissent une luminance constante, indépendante de la direction de réflexion,
- une image de l'environnement est disponible, représentée par des pixels au format RVB,
- une carte de réflectance associée à cette image est connue, i.e. pour chaque pixel de l'image, nous disposons du rapport entre la luminance réfléchie et la luminance incidence à ce pixel

- (pourcentage de luminance réfléchi),
- une carte de profondeur correspondant à cette image est connue, i.e. pour chaque pixel de l'image, nous connaissons les coordonnées du point 3D représenté par ce pixel et nous pouvons estimer la normale de ce point (en utilisant la direction des points voisins, représentés par les pixels voisins sur l'image),
- pour deux points 3D proches, une source ponctuelle les éclairant peut être assimilée à une source directionnelle.

Beaucoup d'hypothèses sont faites pour pouvoir extraire les sources lumineuses. De plus, l'image de l'environnement doit être partitionnée en plusieurs régions par l'utilisateur. Une région dans une image représente un groupe de pixels éclairés par la même source lumineuse et cette source doit pouvoir être assimilée à une source directionnelle (tous les points d'un même groupe doivent être proche dans le cas d'une source ponctuelle). A partir de ces hypothèses, l'estimation d'une source directionnelle dans une région est effectuée.

### 1.5.1 Source directionnelle pour une région

Sous l'hypothèse que tous les points de la région sont éclairés par une source directionnelle, la direction de cette source est estimée avec au moins trois échantillons (trois pixels). Connaissant la carte de réflectance et la carte de profondeur, l'estimation est effectuée facilement en résolvant l'équation de la luminance émise par chaque échantillon.

### 1.5.2 Source directionnelle pour $n$ régions

Une direction de source directionnelle est estimée pour chacune des  $n$  régions. Erwan Guillou fait l'hypothèse que toutes ces sources estimées représentent une seule et unique source directionnelle.

Une erreur est estimée sur chaque direction de source (par recalcul de la luminance réfléchi par chacun des pixels de la région concernée). La direction de la source directionnelle globale à ces  $n$  régions est estimée en effectuant la moyenne des  $n$  directions de source déjà trouvées, pondérées par un poids représentant l'erreur estimée sur chacune des directions. Plus l'erreur d'une direction estimée pour une région est importante, plus le poids associé est faible.

### 1.5.3 Source ponctuelle

$n$  sources directionnelles sont estimées sur  $n$  régions. A présent il fait l'hypothèse que toutes ces sources directionnelles représentent une seule source ponctuelle. Chaque région est de petite taille et la source directionnelle estimée pour une région représente en fait une source ponctuelle, la même pour les  $n$  régions.

Un barycentre est estimé pour chaque région : il est obtenu, pour une région, en effectuant une moyenne des positions des points 3D échantillonnant cette région. Pour une région, le barycentre estimé plus la direction de la source lumineuse éclairant cette région (point + vecteur) représentent la droite d'incidence de cette région. Ainsi,  $n$  droites d'incidence sont estimées. La position de la source ponctuelle correspond à l'intersection de ces  $n$  droites d'incidence, elle est estimée par la méthode des pseudo-inverses. Cette méthode n'est pas expliquée ici, elle est détaillée dans la section 2.3.1 sur le *Travail réalisé*.

### 1.5.4 Plusieurs sources ponctuelles

Comme dans le cas de détection d'une source ponctuelle,  $n$  sources directionnelles sont estimées sur  $n$  régions. L'hypothèse est faite que toutes ces sources directionnelles représentent plusieurs

sources ponctuelles.

Comme précédemment, un barycentre est estimé pour chaque région, et une droite d'incidence est obtenue pour chaque région. Ensuite, un algorithme de classification est employé pour regrouper les droites d'incidence qui représentent une même source ponctuelle. Cet algorithme classe les droites d'incidence les unes après les autres. Supposons que  $i$  droites d'incidence ( $i < n$ ) soient déjà classées en  $j$  groupes ( $j < i$ ). Alors, pour classer la  $i + 1^{me}$  droite, une erreur est estimée pour l'attribution de cette droite dans chacun des  $j$  groupes. Cette droite est classée dans le groupe où elle augmente le moins l'erreur. Attention toutefois, si l'erreur la moins importante est supérieure à un seuil fixé, alors cette droite  $i + 1$  n'est associée à aucun groupe, elle constitue un nouveau groupe  $j + 1$ . Lorsque toutes les droites sont classées, la position de la source lumineuse est évaluée dans chaque groupe en utilisant, comme précédemment, la méthode des pseudo-inverses.

Nous venons de voir une technique permettant d'extraire des sources lumineuses ponctuelles et directionnelles à partir d'une seule image. Malheureusement cette méthode utilise de lourdes hypothèses, un partitionnement manuel de l'image en régions et ne permet d'utiliser que des objets au comportement parfaitement diffus. Ceci est très contraignant et peu réaliste dans le cas d'utilisation de lumigraphes représentant des objets réels aux propriétés photométriques bien plus complexes que la réflexion diffuse.

L'utilisation d'une seule image rend l'extraction plus difficile, elle oblige à poser des hypothèses très strictes. Dans le cas des lumigraphes, ils sont représentés par un ensemble d'images, permettant d'obtenir plus d'informations utiles à l'extraction de ces sources.

## Chapitre 2

# Travail réalisé

### 2.1 Données d'entrée du programme

La classification des voxels en fonction de leur réflectance, vue dans la section 1.3, définit une partition d'ensembles de voxels. Chaque groupe est constitué de voxels ayant des propriétés radiométriques similaires, ils modélisent une partie uniforme de la surface de l'objet basé-image (représenté par un lumigraphe).

Ces voxels ont la même fonction de réflectance bidirectionnelle (BRDF). La réflectance bidirectionnelle définit le pourcentage d'énergie lumineuse réfléchie par rapport à la quantité d'énergie lumineuse reçue, et ce, pour chaque couple (direction d'incidence - direction de réflexion).

Le travail de détection des sources lumineuses, présentes lors de l'acquisition de l'objet, est réalisé sur un seul ensemble de voxels. Il détermine les sources de lumière éclairant cette partie de surface, et les caractéristiques de la surface. Cette analyse est effectuée indépendamment sur chaque ensemble fourni par la classification.

Chaque pixel d'une photographie, exprimé dans le format RVB<sup>1</sup>, représente une luminance réfléchie par un voxel dans une direction donnée. Le voxel intersecté par cette direction est recherché, et le couple (luminance réfléchie - direction de réflexion) est stocké dans ce voxel.

La direction de réflexion est déterminée par les coordonnées du pixel (position sur le plan  $(s, t)$ ), le point de vue de la photographie (position sur le plan  $(u, v)$ ) et le numéro du slab  $(uvst)$  utilisé.

Chaque voxel dispose ainsi d'un ensemble de couples (luminance émise - direction de réflexion), les luminances étant extraites à partir des photographies.

Les caractéristiques d'un voxel, utilisées par l'extraction de sources lumineuses, sont donc :

- ses coordonnées,
- sa position dans l'octree (modélisation géométrique de l'objet),
- la direction de sa normale,
- un ensemble de couples (luminance réfléchie - direction de réflexion).

---

<sup>1</sup>format de représentation des couleurs par trois composantes (Rouge, Vert et Bleu)

## 2.2 Sources de lumière et propriétés de réflectance

Les principaux types de sources lumineuses sont répertoriés afin de déterminer les sources utilisées lors de l'acquisition d'un objet basé-image<sup>2</sup>. Cet objet n'est représenté par aucune modélisation géométrique ou topologique.

Un lumigraphe est un exemple d'objet basé-image où la prise de photographies de cet objet suivant divers points de vue est la seule représentation de cet objet. L'acquisition d'un lumigraphe respecte des conditions précises d'éclairage (éclairage identique pendant toute la durée de l'acquisition) et de positionnement (objet statique, il doit rester sans mouvement pendant l'acquisition).

Une étude de différents calculs d'illumination permet de choisir le modèle d'illumination le mieux adapté pour réévaluer le comportement de la source lumineuse détectée à partir du lumigraphe.

### 2.2.1 Les sources lumineuses

Chaque source lumineuse possède ses propres caractéristiques (géométrie, plages de longueur d'ondes émises, énergie lumineuse émise, points d'émission, directions d'émission, etc). Pour simplifier ces données, les sources lumineuses sont classées selon leur mode de diffusion de l'énergie lumineuse dans l'environnement.

#### La source ponctuelle

La source ponctuelle diffuse uniformément la lumière dans toutes les directions autour de sa position : voir figure 2.1. Elle peut être utilisée pour représenter une ampoule, par exemple.

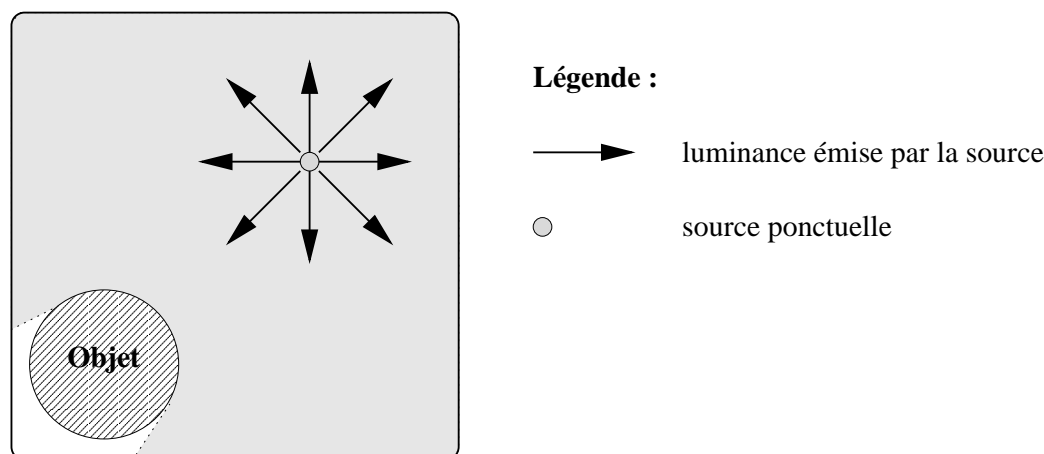


FIG. 2.1 – Source ponctuelle, émettant une énergie lumineuse constante quelle que soit la direction d'émission

#### La source directionnelle

Elle correspond à une source placée à l'infini et est souvent assimilée à une source ponctuelle infiniment loin. Elle éclaire dans une direction unique : voir figure 2.2. Elle peut représenter une source très éloignée tel que le soleil par exemple.

<sup>2</sup>défini par un ensemble de photographies ou une séquence vidéo

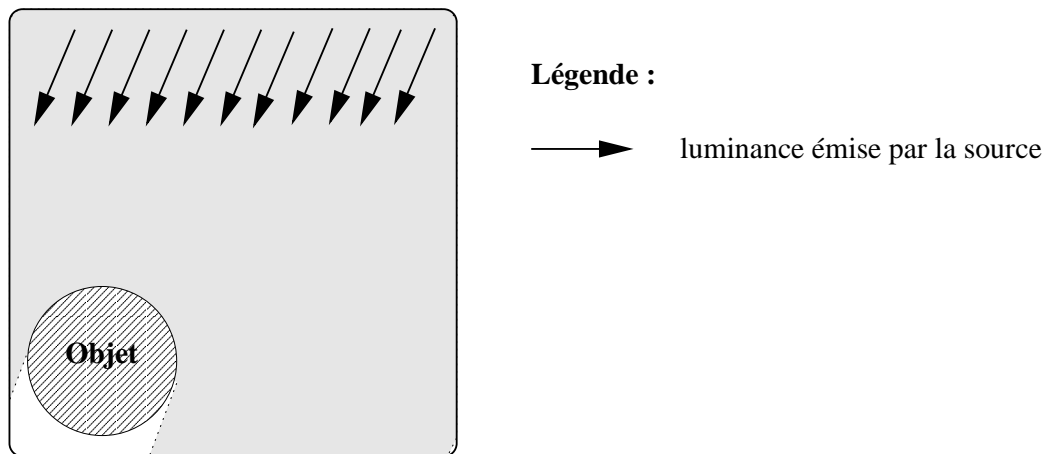


FIG. 2.2 – Source directionnelle, émettant dans une seule direction

### Le spot

C'est une source ponctuelle pour laquelle les directions d'émission sont restreintes à un cône : voir figure 2.3. Il sert à représenter un projecteur.

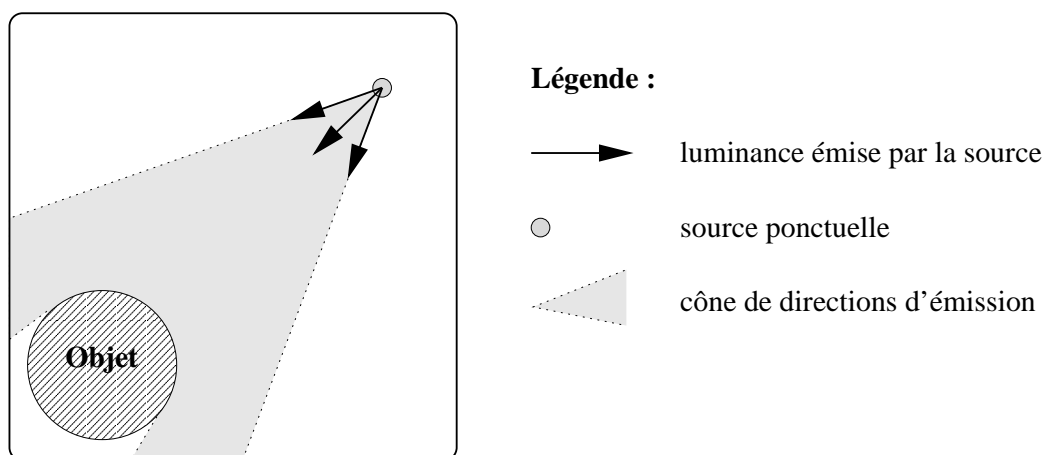


FIG. 2.3 – Spot, émettant de la lumière dans un cône de directions

### La source surfacique

Elle diffuse de la lumière vers un large cône de directions, avec une origine d'émission représentée par une surface et non par un point : voir figure 2.4.

#### 2.2.2 Les calculs d'illumination

La lumière réfléchiée par la surface des objets est la seule donnée extraite à partir des photographies d'un lumigraphie. Les autres interactions avec la surface telles que la transparence, la diffraction ne sont pas prises en compte pour le moment. Elles demandent une analyse plus précise des photographies, non effectuée pendant ce stage. La priorité est mise sur la réflexion de la lumière pour l'obtention de premiers résultats exploitables.



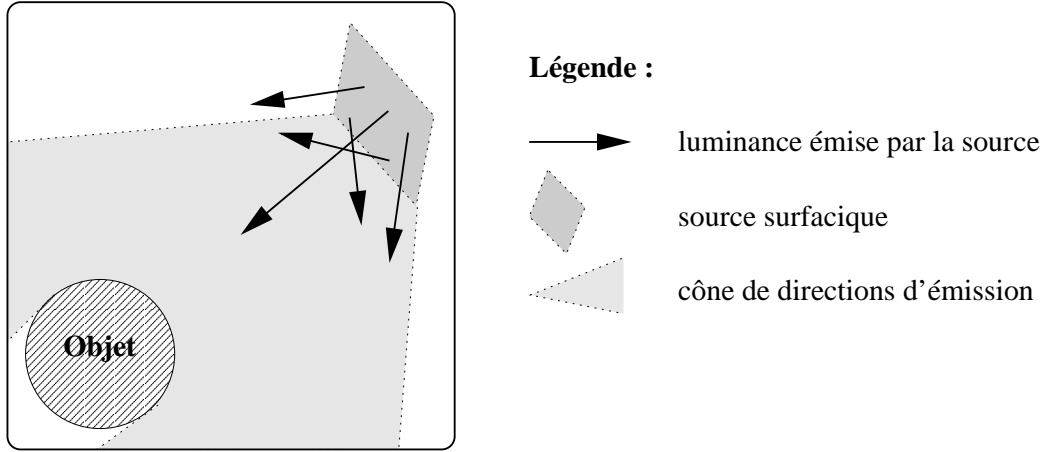


FIG. 2.4 – Source surfacique, où toute la surface émet de la lumière

Plusieurs modèles de BRDF sont utilisés pour estimer la luminance réfléchiée par la surface d'un objet. Les propriétés de réflexion de la surface définissent le modèle à utiliser.

Les principes développés ci-dessous sont des simplifications de modèles physiques, permettant d'améliorer les temps de calcul. Ils sont fréquemment utilisés en rendu réaliste.

### La réflexion diffuse

Lorsqu'une surface est diffuse, la luminance réfléchiée par un point de cette surface est identique dans toutes les directions de réflexion (la BRDF associée à cette surface est alors une fonction constante).

Lambert a effectué des travaux sur les surfaces parfaitement diffuses. Une de ces surfaces, éclairée par une source lumineuse  $S$ , réfléchit, en un point  $P$  visible de la source, une luminance proportionnelle au cosinus de l'angle  $\theta$  entre la direction  $\vec{T}$  de la source  $S$  et la normale  $\vec{N}$  à la surface : voir figure 2.5.

La luminance réfléchiée varie en fonction de la direction d'incidence<sup>3</sup>, elle devient nulle lorsque cette direction est tangente à la surface.

Une surface Lambertienne<sup>4</sup>, éclairée par une source lumineuse  $S$ , émet en un point  $P$  de la surface, vers une direction de réflexion  $\vec{R}$ , une luminance vérifiant l'équation d'illumination suivante :

$$L_r = L_s K_d \cos \theta$$

avec :

- $L_r$ , la luminance réfléchiée par le point  $P$  vers  $\vec{R}$ ,
- $L_s$ , la luminance émise par la source  $S$ , arrivant sur la surface au point  $P$ ,
- $K_d$ , le coefficient diffus de réflexion (compris entre 0 et 1), appartenant aux propriétés du matériau de la surface,
- $\theta$ , l'angle d'incidence entre la normale  $\vec{N}$  à la surface et la direction  $\vec{T}$  de la source lumineuse (direction d'incidence).

<sup>3</sup>direction de la source lumineuse

<sup>4</sup>surface parfaitement diffuse

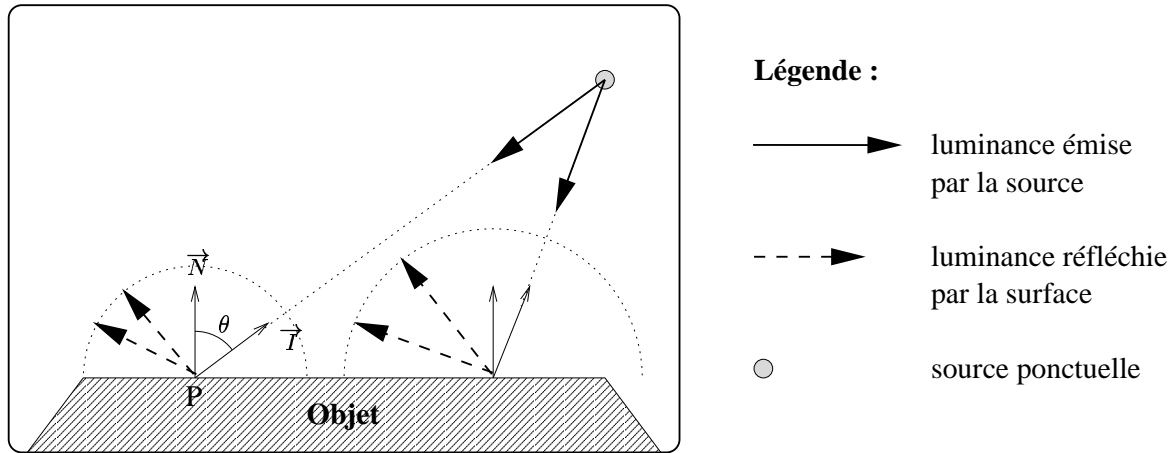


FIG. 2.5 – La lumière est réfléchie par une surface parfaitement diffuse. La luminance réfléchie dépend de l'angle d'incidence  $\theta$

### La réflexion spéculaire

La luminance réfléchie, par un point  $P$  d'une surface spéculaire, dépend de la direction de réflexion  $\vec{R}$ . Cette luminance est maximale lorsque la direction de réflexion  $\vec{R}$  est le symétrique de  $\vec{I}$  (la direction de la source  $S$ ) par rapport à la normale  $\vec{N}$  : cette direction particulière est notée  $\vec{R}_{max}$ , voir figure 2.6.

La luminance réfléchie varie, en opposition, avec l'angle  $\phi$  entre la direction de réflexion  $\vec{R}$  et la direction de réflexion maximale  $\vec{R}_{max}$ .

Le lobe spéculaire apparaît, en grisé, sur la figure 2.6. Il représente la puissance des luminances réfléchies, dans toutes les directions, au point  $P$ . Ce lobe spéculaire se traduit par un reflet, i.e. une région de la surface apparaissant plus brillante lorsqu'elle est observée depuis la direction  $\vec{R}_{max}$ .

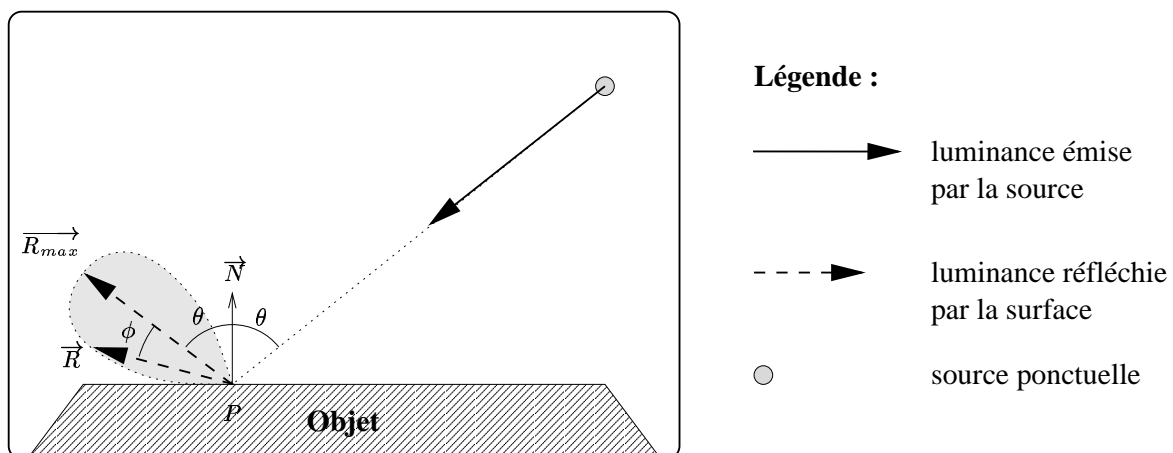


FIG. 2.6 – La lumière est réfléchie par une surface spéculaire. Le lobe spéculaire représente l'ensemble des directions réfléchissant de la lumière au point  $P$

## Le modèle d'illumination de Phong

Il a été développé par Phong Bui-Tuong [49] en 1975 pour les surfaces mixtes (diffuses et spéculaires), représentant la majeure partie des matériaux utilisés. Ce modèle intègre les deux types de réflexion vus ci-dessus, à savoir, la réflexion diffuse et la réflexion spéculaire.

La luminance réfléchie par une surface mixte décroît rapidement lorsque l'angle  $\phi$  augmente. Cette décroissance rapide est représentée par la luminance due à la réflexion spéculaire proportionnelle au cosinus (élevé à une puissance  $n$ ) de l'angle  $\phi$ . La modification du coefficient  $n$ , appelé exposant de réflexion spéculaire, permet d'obtenir des reflets plus ou moins contrastés.

Une surface mixte, éclairée par une source lumineuse  $S$ , réfléchit une luminance (en un point  $P$  de cette surface, vers une direction  $\vec{R}$ ) s'écrivant, en utilisant le modèle de Phong, sous la forme :

$$L_r = L_s(K_d \cos \theta + K_s \cos^n \phi)$$

avec :

- $L_r$ , la luminance réfléchie par le point  $P$  vers  $\vec{R}$ ,
- $L_s$ , la luminance émise par la source  $S$ , arrivant en  $p$ ,
- $K_d$ , le coefficient diffus de réflexion (compris entre 0 et 1), appartenant aux propriétés du matériau de la surface,
- $\theta$ , l'angle d'incidence entre  $\vec{N}$  (la normale à la surface) et  $\vec{I}$  (la direction de la source lumineuse  $S$ ).
- $K_s$ , le coefficient spéculaire de réflexion (compris entre 0 et 1), appartenant aux propriétés du matériau de la surface,
- $\phi$ , l'angle entre  $\vec{R}_{max}$  (la direction de réflexion maximale) et  $\vec{R}$  (la direction de réflexion),
- $n$ , l'exposant de réflexion spéculaire.

De nombreux autres modèles d'illumination permettent de représenter la BRDF. Cependant, dans un premier temps nous choisissons de prendre en compte les principaux effets de réflexion présentés ci-dessus.

### 2.2.3 Nos choix

Le modèle d'illumination utilisé est celui proposé par Phong. C'est un modèle empirique, ne représentant aucun modèle physiquement correct mais permettant la synthèse de belles images. Il est adapté à la réflexion lumineuse des matériaux les plus couramment utilisés, permettant de détecter la plupart des types de surfaces dans les lumigraphes.

Il correspond à un modèle d'illumination locale, où seule la lumière frappant la surface de l'objet en provenance directe d'une source lumineuse est prise en compte. L'acquisition de lumigraphes est effectuée, en général, en plaçant l'objet à photographier dans un décor neutre. Le décor autour de l'objet est constitué de rideaux noirs, réfléchissant très peu de lumière. Ainsi, l'objet est essentiellement éclairé par les sources lumineuses, les inter-réflexions lumineuses entre l'objet et les autres éléments de la pièce sont négligeables.

Si plusieurs sources éclairent un point  $P$  de la surface, le calcul se généralise en sommant la réflexion de lumière en provenance de ces diverses sources :

$$L_r = \sum_{k=1}^m L_{s_k} (K_d \cos \theta_k + K_s \cos^n \phi_k)$$

avec :

- $L_r$ , la luminance réfléchie par le point  $P$  vers  $\vec{R}$  (prise en compte des  $m$  sources),

- $m$ , le nombre de sources lumineuses qui éclairent  $P$ ,
- $L_{s_k}$ , la luminance émise par la source  $S_k$ ,
- $\theta_k$ , l'angle d'incidence entre la normale  $\vec{N}$  et  $\vec{I}_k$  (la direction de la source lumineuse  $S_k$ ),
- $\phi_k$ , l'angle entre la direction  $\vec{R}_{max_k}$  de réflexion maximale par rapport à  $S_k$  et la direction  $\vec{R}$  de réflexion.

## 2.3 Détection d'une source : analyses parallèles

L'analyse est effectuée sur des cas élémentaires : l'utilisation d'une seule source lumineuse lors de l'acquisition. Ces travaux exploratoires sont ciblés sur les sources paraissant les plus faciles à déterminer :

- une source ponctuelle diffusant la lumière à partir d'un point d'émission. Le calcul de la luminance réfléchie par un point d'une surface utilise une seule direction d'incidence : celle provenant de la source ponctuelle,
- une source directionnelle émettant une luminance dans une seule direction. Par conséquent, la direction d'incidence d'un point d'une surface est unique.

Ces deux types de sources permettent le calcul de la luminance émise par un point en retrouvant la direction d'incidence. Pour chaque point de la surface, la lumière incidente arrive d'une seule direction : ceci simplifie le calcul d'illumination de la surface.

En revanche, les caractéristiques d'une source surfacique sont plus complexes à estimer. La source peut être assimilée à plusieurs sources ponctuelles puisqu'elle diffuse de la lumière depuis toute sa surface (théoriquement, elle représente une infinité de sources ponctuelles). Un point de la surface, éclairé par une source surfacique, reçoit de la lumière en provenance de plusieurs directions d'incidence. Ainsi, le calcul de la luminance émise par ce point n'est pas trivial, il est similaire au calcul de luminance en présence de plusieurs sources lumineuses.

L'utilisation de ce modèle d'illumination permet de déduire certaines propriétés de la surface, apparaissant dans le calcul de luminance : le coefficient diffus, le coefficient spéculaire, ainsi que l'exposant de réflexion spéculaire de la surface. Ces propriétés reflètent le comportement (type de réflexion lumineuse) du matériau composant l'objet. Par exemple, un morceau de craie peut être approché par une surface parfaitement diffuse, un objet métallique possède un reflet spéculaire, un miroir dévoile une surface parfaitement spéculaire, etc.

Mais, pour de nombreuses raisons, tous les matériaux ne peuvent être représentés par ces trois coefficients. Par exemple, les surfaces anisotropes ne sont pas détectées : ces surfaces ont un modèle de réflexion plus complexe, non représentable par uniquement trois coefficients. La surface de ces matériaux a subi des micro-variations géométriques, produisant des comportements de réflexion lumineuse atypiques. Par exemple les matériaux brossés, comme le dessous d'une montre, laissent apparaître à l'observateur des cercles concentriques de même luminance.

L'analyse est restreinte à la détection de sources ponctuelles et directionnelles. Une seule source lumineuse est utilisée pendant l'acquisition de l'objet basé-image, simplifiant l'analyse dans un premier temps.

L'aspect lumineux des surfaces de l'objet est évalué par la détection des trois coefficients caractérisant chaque surface. Ces coefficients définissent le modèle de réflexion sur toute la surface : la fonction de réflectance bidirectionnelle de la surface est estimée (calcul d'une luminance réfléchie en fonction des directions d'incidence et de réflexion).

Les surfaces parfaitement diffuses sont distinguées des surfaces mixtes. Ces surfaces sont caractérisées par un seul coefficient : le coefficient diffus. Le calcul d'illumination d'une de ces surfaces est simplifié, il n'utilise que le terme de réflexion diffuse.

### 2.3.1 Source ponctuelle - surface diffuse

Cette analyse s'effectue sous l'hypothèse d'une acquisition de l'objet en présence d'une source ponctuelle. De plus, chaque voxel utilisé dans l'analyse représente un élément d'une surface parfaitement diffuse.

La luminance réfléchie par un voxel  $V$  est estimée par :

$$L_r = L_s K_d \cos \theta$$

Cette luminance est indépendante de la direction de réflexion.  $\theta$  représente l'angle d'incidence, invariant selon la direction de réflexion.

La direction d'incidence est estimée en chaque voxel de la surface. Lorsque cette direction est obtenue pour tous les voxels, le point d'intersection de cet ensemble de directions est recherché, une estimation de la position de la source lumineuse est ainsi obtenue : voir figure 2.7.

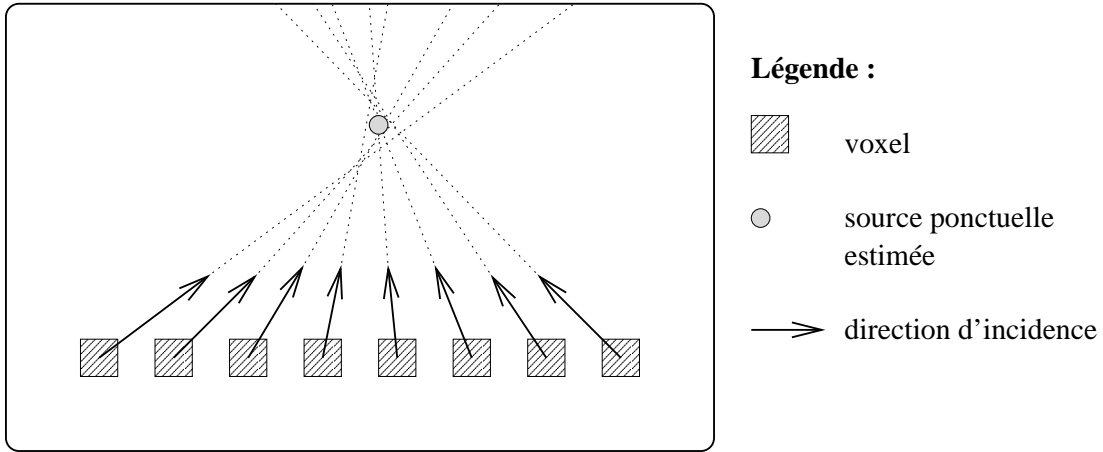


FIG. 2.7 – L'intersection de toutes les directions d'incidence définit la position de la source ponctuelle

#### Direction d'incidence initiale

La luminance réfléchie par un voxel  $V$ , représentant une surface lambertienne, est constante quelle que soit la direction de réflexion. Elle est obtenue, soit en récupérant une luminance réfléchie par ce voxel dans une direction, soit en moyennant plusieurs luminances correspondant à plusieurs directions de réflexion : cette moyenne évite les imprécisions en atténuant d'éventuels bruits présents dans les photographies de l'objet.

De la formule présentée ci-dessus,  $L_r$  est la seule valeur connue.  $L_s$  et  $K_d$  sont des constantes, indépendantes du voxel utilisé. Par conséquent, la luminance renvoyée par un voxel dépend essentiellement de  $\theta$ , l'angle d'incidence entre  $\vec{N}$  (la normale du voxel) et  $\vec{T}$  (la direction de la source en ce voxel).

$\theta$  ne peut être estimé directement, mais lorsque  $\vec{T} = \vec{N}$  pour un voxel  $V_{ref}$ , l'angle  $\theta = 0$  et la luminance émise par ce voxel est maximale. Aucun autre voxel ne peut émettre une luminance

plus importante.  $V_{ref}$  est le voxel de référence, car il est utilisé par la suite pour estimer la direction d'incidence des autres voxels.

Le voxel  $V_{ref}$  est recherché. Sous l'hypothèse d'une normale  $\vec{N}_{V_{ref}}$  orientée dans la direction d'incidence, une estimation de  $L_s K_d$  est faite :

$$L_{V_{ref}} = L_s K_d$$

avec  $L_{V_{ref}}$ , la luminance réfléchie par  $V_{ref}$ . Malheureusement, aucun moyen ne permet de différencier  $L_s$  et  $K_d$ .

La première direction d'incidence  $\vec{I}_{V_{ref}}$  trouvée et une estimation de  $L_s K_d$  sont utilisées pour le calcul de la direction d'incidence des autres voxels.

### Autres directions d'incidence

La direction d'incidence des autres voxels est recherchée. La direction d'incidence des voxels ayant une luminance réfléchie nulle n'est pas évaluée. Ces voxels ne sont pas éclairés par la source lumineuse et, s'ils sont utilisés, leur angle d'incidence  $\theta$  sera fixé à  $\frac{\pi}{2}$  : valeur ne reflétant pas la réalité (l'angle est souvent supérieur à  $\frac{\pi}{2}$ ).

Pour les autres voxels  $V$ ,  $L_V$  (la luminance réfléchie par le voxel  $V$ ) et  $L_s K_d$  sont connus. L'angle d'incidence  $\theta_V$  est évalué par :

$$\theta_V = \arccos \frac{L_V}{L_s K_d}$$

Un cône de directions d'incidence est obtenu pour chaque voxel  $V$  : voir figure 2.8.

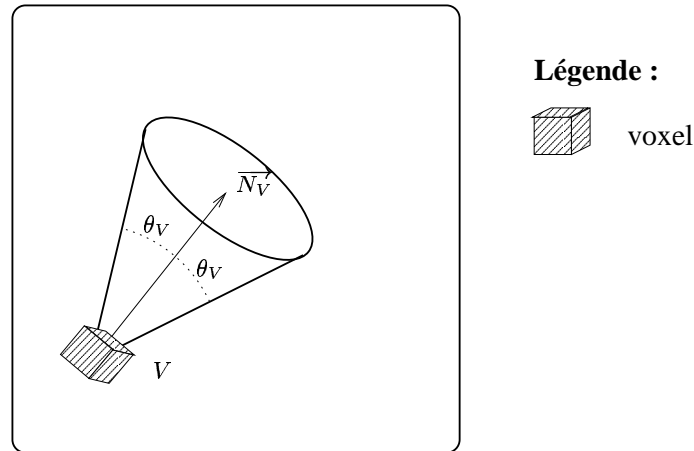


FIG. 2.8 – La connaissance de la normale et de l'angle d'incidence d'un voxel définit un cône de directions d'incidence

La direction d'incidence de chaque voxel est obtenue en coupant le cône de directions d'incidence par le  $\text{plan}(V, V_{ref}, \vec{I}_{V_{ref}})$  : plan défini par le voxel en cours d'analyse, le voxel réfléchissant la plus grande luminance ainsi que sa direction d'incidence. La coupe d'un cône par un plan donne, la plupart du temps, deux solutions :  $\vec{I}_{V,1}$  et  $\vec{I}_{V,2}$ , voir figure 2.9.

La figure 2.9 donne une idée sur la solution à trouver mais ne permet pas de déterminer avec précision  $\vec{I}_V$ , la direction d'incidence du voxel  $V$ . Sur cette figure, le centre de chaque voxel ( $V$  et  $V_{ref}$ ) est dans le plan.

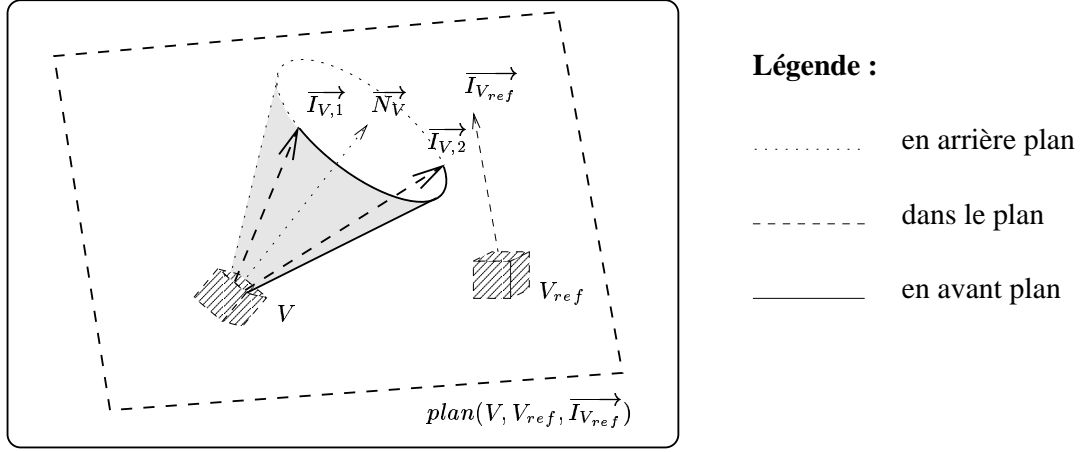


FIG. 2.9 – Le cône est intersecté par le plan à deux endroits, formant deux directions d'incidence

Seule, la résolution d'une équation peut déterminer cette direction. Pour cela, la direction d'incidence  $\vec{I}_V$  doit être clairement définie.

$\vec{I}_V$  est de norme 1 :

$$\|\vec{I}_V\| = 1$$

Le produit scalaire entre  $\vec{I}_V$  et la normale de  $V$  vaut le cosinus de l'angle  $\theta_V$  :

$$\vec{I}_V \cdot \vec{N}_V = \cos \theta_V = \frac{L_V}{L_s K_d}$$

$\vec{I}_V$  est orthogonale à la normale du plan de coupe :

$$\vec{I}_V \cdot \vec{N}_{plan} = 0$$

Et le plan de coupe est défini par le produit vectoriel entre le vecteur reliant les deux voxels  $V$  et  $V_{ref}$ , et la direction d'incidence du voxel  $V_{ref}$  :

$$\vec{N}_{plan} = \overrightarrow{VV_{ref}} \wedge \vec{I}_{V_{ref}}$$

Ainsi, un système de trois équations à trois inconnues (les coordonnées de  $\vec{I}_V$ ) est obtenu :

$$\begin{cases} \|\vec{I}_V\| &= 1 \\ \vec{I}_V \cdot \vec{N}_V &= \frac{L_V}{L_s K_d} \\ \vec{I}_V \cdot \vec{N}_{plan} &= 0 \end{cases}$$

La résolution de ce système donne zéro, une ou deux directions. Le cas où deux directions sont obtenues est illustré sur la figure 2.9. Les autres résultats apparaissent sur les figures 2.10 et 2.11.

Si la résolution d'équation ne donne aucune solution pour un voxel, sa direction d'incidence ne peut être estimée. Par conséquent, l'analyse se poursuit avec un autre voxel.

Si le système d'équations admet une ou deux directions d'incidence, la validité de chacune de ces directions doit être vérifiée. Le point d'intersection entre les directions d'incidence  $\vec{I}_V$  et  $\vec{I}_{V_{ref}}$  est recherché en résolvant l'équation (selon les trois coordonnées) :

$$P_V + k\vec{I}_V = P_{V_{ref}} + k_{ref}\vec{I}_{V_{ref}}$$

avec :

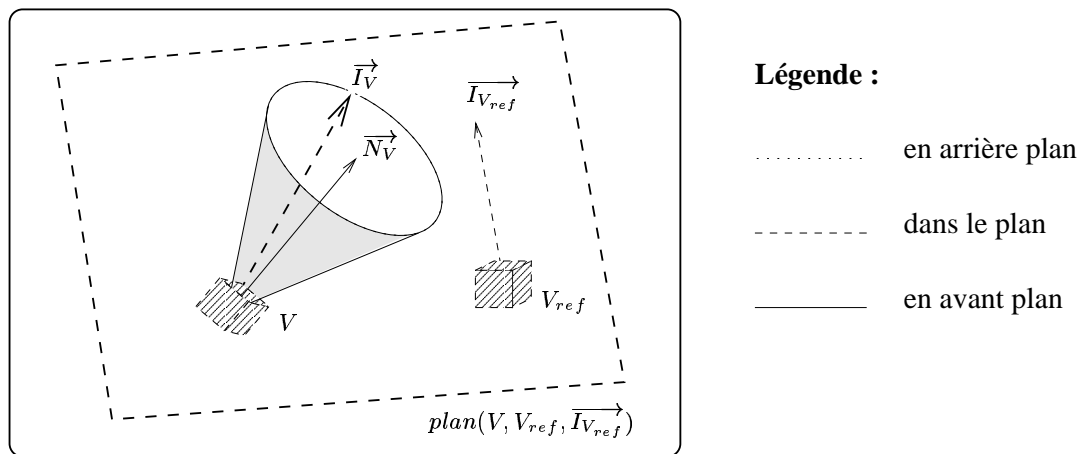


FIG. 2.10 – Le cône de directions est tangent au plan, et le reste du cône est en avant plan. Ainsi, une direction d'incidence représente l'intersection du cône avec le plan.

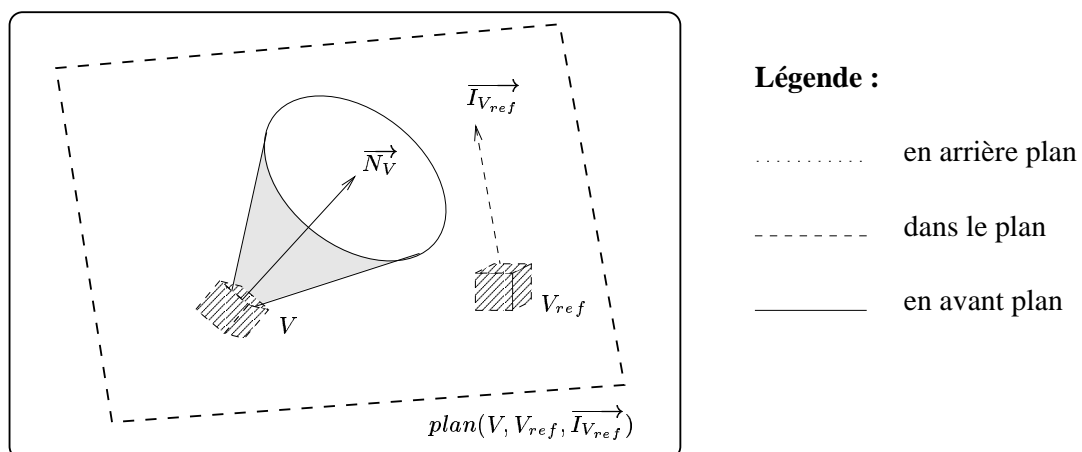


FIG. 2.11 – Le cône de directions est entièrement en avant plan, il n'est pas coupé par le plan. Ainsi, aucune direction d'incidence n'apparaît



- $P_V$ , le point représentant le voxel  $V$  (coordonnées du centre du voxel),
- $P_{V_{ref}}$ , le point représentant le voxel  $V_{ref}$ ,
- $P_V + k\vec{I}_V$  représente le point d'intersection cherché.

Ce point d'intersection doit être situé sur chacune des demi-droites d'incidence : la direction d'incidence  $\vec{I}_V$  est valide lorsque  $k > 0$  et  $k_{ref} > 0$  (voir figure 2.12).

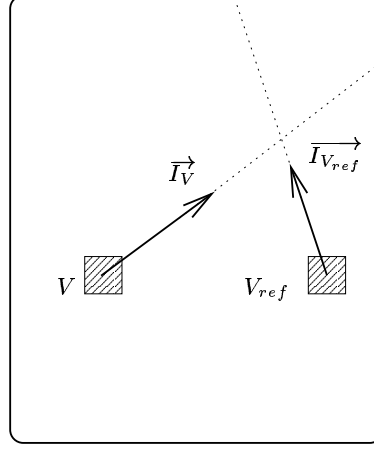


FIG. 2.12 – La direction d'incidence du voxel  $V$  est valide car le point d'intersection est situé sur les demi-droites d'incidence des deux voxels

Dans tous les autres cas, la direction d'incidence n'est pas valide : voir figure 2.13.

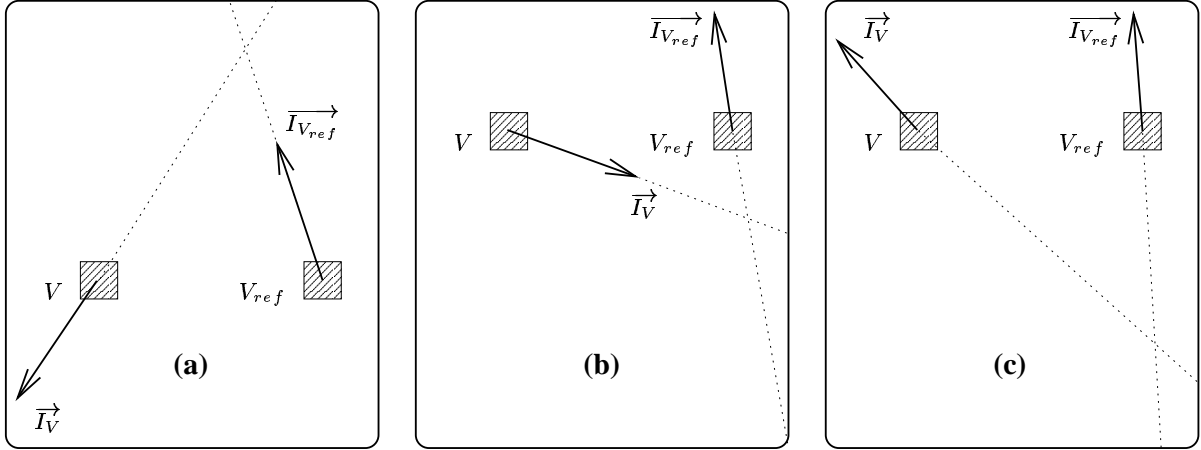


FIG. 2.13 – Sur les trois figures, la direction d'incidence du voxel  $V$  est incorrecte. Sur la figure (a), le point d'intersection n'est pas sur la demi-droite d'incidence du voxel  $V$ . Sur la figure (b), le point d'intersection n'est pas sur la demi-droite d'incidence du voxel  $V_{ref}$ . Et sur la figure (c), le point d'intersection n'est situé sur aucune demi-droite d'incidence

Lorsque la résolution d'équation sur un voxel  $V$  fournit deux directions, chacune de ces directions est vérifiée afin d'en déduire la vraie direction d'incidence de  $V$ .

L'obtention de deux directions lors de la résolution du système d'équation est le cas le plus fréquent. La figure 2.14 illustre les configurations-type lors de la vérification de la validité des deux directions obtenues.

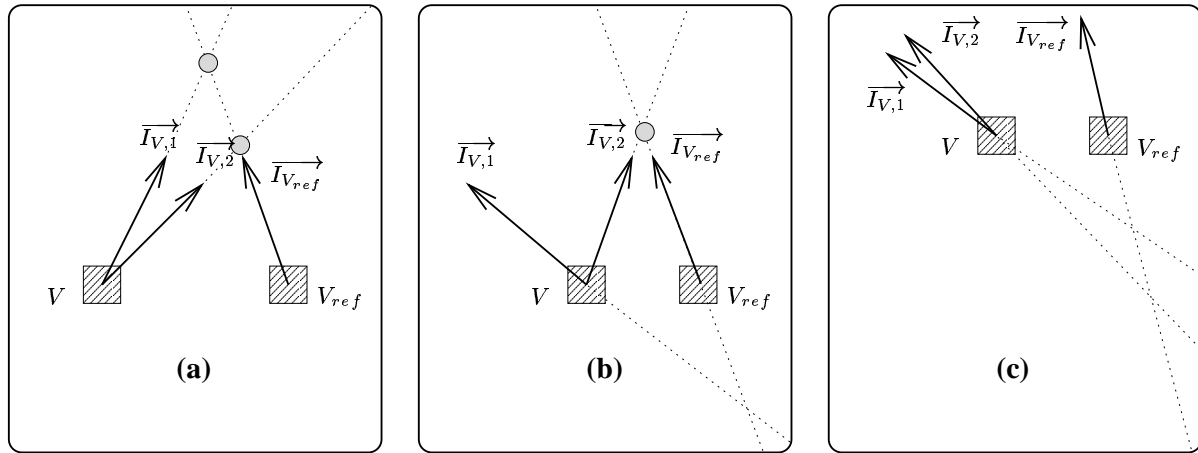


FIG. 2.14 – Sur ces trois figures, la résolution du système d'équations permet d'obtenir deux directions pour le voxel  $V$ , pouvant être la direction d'incidence de ce voxel. La vérification de chacune de ces directions décide si elles sont correctes. Sur la figure (a), les deux directions du voxel  $V$  sont valides. La vérification ne permet pas de choisir la direction d'incidence. Les deux directions du voxel  $V$  sont stockées pour une analyse complémentaire faite ultérieurement. En effet, la source ponctuelle peut être positionnée à une des deux intersections présentes sur le schéma (a). Sur la figure (b), une seule direction est valide pour le voxel  $V$ . Elle correspond à la direction d'incidence du voxel  $V$ . La source lumineuse est positionnée sur l'intersection située au dessus des deux voxels. Sur la figure (c), aucune des deux directions n'est valide. Aucune direction ne permet de situer la position de la source lumineuse.

Après vérification, si les deux directions associées à un voxel  $V$  sont correctes, la direction d'incidence de  $V$  ne peut pas être trouvée (une des deux directions calculées par la résolution d'équation est la direction d'incidence, mais la vérification ne permet pas de choisir laquelle). Les deux directions obtenues par résolution sont stockées dans un tableau temporaire, et le choix de la direction d'incidence est effectué ultérieurement, lorsque l'analyse est en mesure de prendre une décision : voir la section *Utilisation de directions complémentaires* plus loin dans ce chapitre, page 35. L'analyse se poursuit avec les voxels suivants.

Enfin, si une seule direction d'incidence est correcte, l'analyse pour ce voxel est terminée. La direction d'incidence est trouvée, elle est stockée puis l'analyse des autres voxels est effectuée (le stockage de la direction d'incidence trouvée pour chaque voxel est expliqué dans la section suivante).

Dans la plupart des cas, la direction d'incidence est détectée. Cependant, quelques configurations posent problème et perturbent la vérification. La figure 2.15 détaille deux situations où la vérification atteint ses limites.

### Stockage des directions d'incidence

Chaque fois qu'une direction d'incidence est trouvée pour un voxel, elle est stockée, non pas sous forme d'une droite (un point et un vecteur directeur), mais comme une intersection de deux plans. L'utilisation de plans facilite le calcul de l'intersection des directions d'incidence, présenté dans la section suivante.

La droite représentant la direction d'incidence est transformée en intersection de deux plans. En effet, l'intersection de deux plans (non coplanaires) représente une droite. Un repère orthonormé

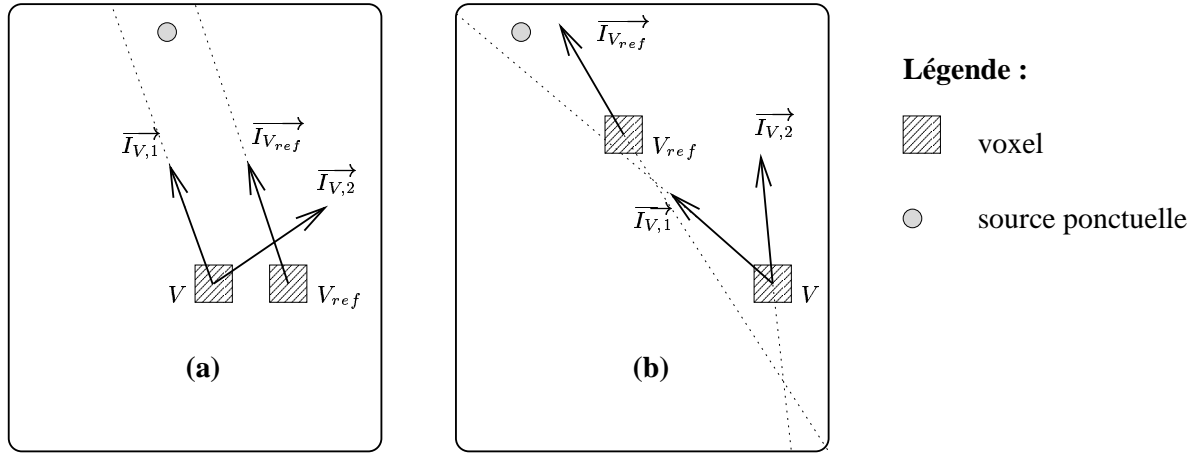


FIG. 2.15 – Les deux figures montrent une faille dans le système de vérification. Pour mieux comprendre les figures, la position de la source à déterminer est indiquée sur chaque figure. Sur la figure (a), la direction 2 est la seule direction valide, elle devient la direction d'incidence du voxel  $V$ . En réalité, vu la position de la source ponctuelle, la direction 1 est plus représentative de la direction d'incidence. Malheureusement, la vérification est effectuée sans la connaissance de la position de la source et la droite représentée par la direction d'incidence 1 du voxel  $V$  n'intersecte pas la droite d'incidence du voxel  $V_{ref}$ . Lorsque ce cas de figure apparaît, la source est souvent très éloignée de l'objet et elle est finalement détectée comme une source directionnelle. Sur la figure (b), aucune direction n'est valide. Ainsi, aucune direction d'incidence n'est trouvée pour le voxel  $V$ . La connaissance de la position de la source permet de définir la direction 1 de  $V$  comme la direction d'incidence. Cette configuration est rarement rencontrée car le voxel  $V$  n'est pas éclairé par la source lumineuse, il est caché par le voxel  $V_{ref}$ .

est défini, tel que la direction d'incidence  $\vec{I}_V$  soit un axe du repère. Le repère  $(\vec{I}_V, \vec{J}, \vec{K})$  est obtenu, comme indiqué sur la figure 2.16.

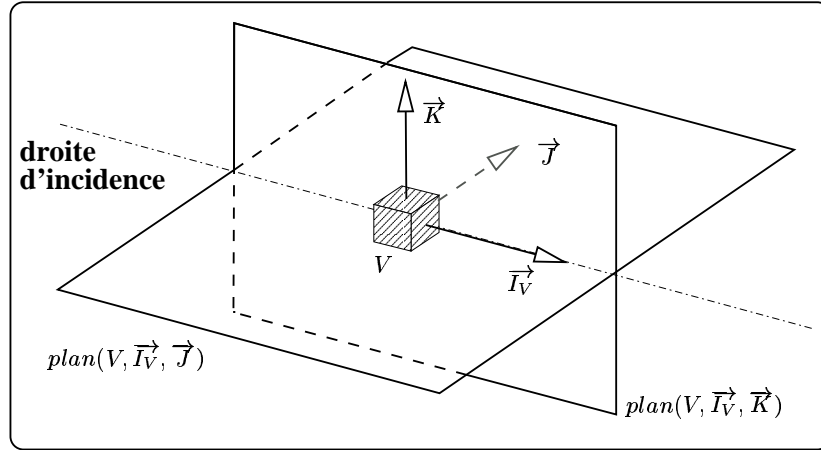


FIG. 2.16 – Repère orthonormé centré sur le voxel  $V$ , tel que la droite d'incidence soit définie par l'intersection de deux plans orthogonaux

Un *plan*, représenté par quatre coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , et  $d$  est défini par l'équation :

$$ax + by + cz + d = 0$$

où  $(x, y, z)$  est un point quelconque du *plan*, et  $(a, b, c)$  la normale du *plan*.

L'équation d'un plan est représentée par un produit scalaire entre deux vecteurs :

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = -d$$

également représenté par le produit d'une matrice ligne par une matrice colonne :

$$\begin{pmatrix} a & b & c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (-d)$$

La direction  $\vec{I}_V$  est l'intersection du plan  $(P_V, \vec{I}_V, \vec{J})$ , représenté par les coefficients  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  et  $d_1$ , par le plan  $(P_V, \vec{I}_V, \vec{K})$ , associé aux coefficients  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  et  $d_2$  ( $P_V$  correspond aux coordonnées du voxel  $V$ ).

Ces plans sont stockés dans deux matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \end{pmatrix}$$

avec :

- $\mathcal{M}$ , une matrice sur trois colonnes, correspondant aux coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  de chaque plan,
- $\mathcal{D}$ , une matrice colonne, correspondant au coefficient  $-d$  de chaque plan.

Lors de l'analyse des voxels, chaque direction d'incidence trouvée est transformée en deux plans stockés dans deux nouvelles lignes des matrices  $M$  et  $D$ .

La détermination de  $m$  directions d'incidence se traduit par l'équation matricielle :

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{2m} & b_{2m} & c_{2m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -d_1 \\ -d_2 \\ \vdots \\ -d_{2m} \end{pmatrix}$$

exprimée sous forme plus compacte par :

$$\mathcal{M}\mathcal{X} = \mathcal{D}$$

où  $\mathcal{X}$  représente le point d'intersection de tous les plans calculés précédemment. Ce point d'intersection correspond à la position de la source ponctuelle, il doit être estimé. Malheureusement, l'intersection de plus de trois plans dans un espace 3D ne donne, en général, aucune solution.

### Première estimation du point d'intersection

Le calcul d'une solution approchée de  $\mathcal{X}$  est envisageable. Si la matrice  $\mathcal{M}$  est inversible, la solution s'obtient en multipliant à gauche les deux membres de l'équation par  $\mathcal{M}^{-1}$  :

$$\mathcal{X} = \mathcal{M}^{-1}\mathcal{D}$$

Mais, dans la majeure partie des cas, cette matrice  $\mathcal{M}$  n'est pas inversible. L'utilisation d'une matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ , notée  $\mathcal{M}_{pi}$ , permet le calcul d'une position de la source.

La théorie utilisée pour obtenir  $\mathcal{M}_{pi}$  est extraite du *Numerical Recipes in C* [50].

Toute matrice  $\mathcal{M}$  (de taille  $m \times n$ ,  $m \geq n$ ) admet une décomposition par valeurs propres. Cette décomposition transforme la matrice  $\mathcal{M}$  en produit de trois matrices :

$$\mathcal{M} = \mathcal{U}\mathcal{W}\mathcal{V}^T$$

avec :

- $\mathcal{U}$ , une matrice orthogonale en colonne,
- $\mathcal{W}$ , une matrice diagonale contenant les valeurs propres de  $\mathcal{M}$  sur sa diagonale,
- $\mathcal{V}$ , une matrice orthogonale.

Lorsqu'une matrice est orthogonale en colonne, le produit d'une colonne par elle-même vaut 1, et le produit d'une colonne par une autre vaut 0, d'où :

$$\mathcal{U}^T\mathcal{U} = \mathcal{I}_d$$

avec  $\mathcal{I}_d$ , la matrice identité.

$\mathcal{V}$  est orthogonale en ligne et colonne :

$$\mathcal{V}^T\mathcal{V} = \mathcal{V}\mathcal{V}^T = \mathcal{I}_d$$

En supposant les valeurs propres de  $\mathcal{M}$  non nulles,  $\mathcal{W}$  est inversible.  $\mathcal{W}^{-1}$ , diagonale, contient l'inverse des valeurs propres sur sa diagonale.

Les propriétés sur ces matrices permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}\mathcal{W}^{-1}\mathcal{U}^T\mathcal{M} &= \mathcal{V}\mathcal{W}^{-1}\mathcal{U}^T\mathcal{U}\mathcal{W}\mathcal{V}^T \\ &= \mathcal{V}\mathcal{W}^{-1}\mathcal{I}_d\mathcal{W}\mathcal{V}^T \\ &= \mathcal{V}\mathcal{W}^{-1}\mathcal{W}\mathcal{V}^T \\ &= \mathcal{V}\mathcal{I}_d\mathcal{V}^T \\ &= \mathcal{V}\mathcal{V}^T \\ &= \mathcal{I}_d \end{aligned}$$

Par conséquent, en posant

$$\mathcal{M}_{pi} = \mathcal{V}\mathcal{W}^{-1}\mathcal{U}^T,$$

l'égalité suivante apparaît :

$$\mathcal{M}_{pi}\mathcal{M} = \mathcal{I}_d$$

$\mathcal{M}_{pi}$  est la pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$  (et non l'inverse) car, en général,  $\mathcal{M}\mathcal{M}_{pi} \neq \mathcal{I}_d$ . Cette propriété se déduit de la non-orthogonalité en ligne de  $\mathcal{U}$ .

En multipliant à gauche par  $\mathcal{M}_{pi}$  les deux membres de l'équation  $\mathcal{M}\mathcal{X} = \mathcal{D}$ , la solution est obtenue :

$$\mathcal{X} = \mathcal{M}_{pi}\mathcal{D}$$

Cette méthode reste valide tant que l'inversion de la matrice  $\mathcal{W}$  est réalisable. Lorsque des valeurs propres sont nulles, des 0 apparaissent sur la diagonale de  $\mathcal{W}$ . Ces 0 sont alors recopiés dans la matrice inverse  $\mathcal{W}^{-1}$ . De même, si certaines valeurs propres sont trop infimes ( $< 10^{-6}$  par exemple), les valeurs associées dans  $\mathcal{W}^{-1}$  sont mises à zéro. Les effets de ces modifications sont très minimes : une légère diminution de la valeur  $|\mathcal{X}|$ .

Ainsi, le point d'intersection de tous les plans est trouvé. Une première estimation de la position de la source ponctuelle est obtenue (sans utiliser les voxels pour lesquels le choix de la direction d'incidence n'a pu être effectué parmi deux directions).

### Utilisation de directions complémentaires

Lors des calculs précédents, l'analyse de la direction d'incidence de certains voxels produit deux directions et aucun choix n'est effectué : les deux directions obtenues peuvent potentiellement être des directions d'incidence. Dès que cette indétermination apparaît, les deux directions sont stockées dans un tableau avec une étiquette indiquant le voxel analysé.

A présent, avec une estimation grossière de la position de la source, la détermination de la direction d'incidence pour chacun de ces voxels est plus aisée. A partir de la position d'un voxel  $V$  et de l'estimation de la position de la source, la direction  $\vec{I}_V$  de la source en ce voxel est calculée. Parmi les deux directions stockées  $\vec{I}_{V,1}$  et  $\vec{I}_{V,2}$ , la direction se rapprochant le plus de  $\vec{I}_V$  est choisie. Ce choix s'effectue par le calcul d'un produit scalaire entre  $\vec{I}_V$  et chacune des directions stockées. La direction entraînant le plus grand produit scalaire est retenue.

En traitant tous les voxels ayant une direction d'incidence indéterminée (choix entre deux directions), de nouvelles directions d'incidence sont calculées, de nouveaux plans sont ajoutés dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ .

Une nouvelle estimation (plus précise) de la position de la source est obtenue. Pour effectuer cette estimation, un recalcul de la matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$  est indispensable.

Une synthèse de cette étape de détection d'une source lumineuse ponctuelle permet d'obtenir une vue d'ensemble sur cette détection (voir figure 2.17).

### Erreur de la position calculée

La position  $\mathcal{X}$  calculée de la source représente le point le plus proche de tous les plans définis dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ . Mais  $\mathcal{X}$  n'appartient pas, en général, à ces plans. L'erreur de cette position est estimée en sommant la distance qui sépare  $\mathcal{X}$  de chacun de ces plans.

Lorsqu'un point  $(x, y, z)$  appartient à un plan représenté par les coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$ , le calcul de  $|ax + by + cz + d|$  vaut zéro. Lorsque ce point n'est pas sur le plan, l'estimation de

```

- pour tous les voxels  $V$  faire {
  - calculer la luminance émise par  $V$ ,
  - garder le voxel qui émet la plus forte luminance, noté  $V_{ref}$ 
}
/* Nous obtenons une estimation grossière de  $L_s K_d$  */
/* représentant le produit de la luminance de la source par le coefficient diffus de la surface */

- pour tous les voxels  $V \neq V_{ref}$  faire {
  /* un cône de directions d'incidence est obtenu */
  - résoudre le système d'équation permettant de restreindre ce cône, au plus,
    à deux directions,
  - vérifier la validité des directions d'incidence calculées,
  - si une seule direction est retenue alors {
    - transformer la direction en deux plans,
    - insérer les plans dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ 
  }
  - sinon si les deux directions sont gardées alors {
    - stocker ces deux directions dans un tableau  $T$ 
  }
}
- calculer la pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ , notée  $\mathcal{M}_{pi}$ ,
- calculer  $\mathcal{X} = \mathcal{M}_{pi}\mathcal{D}$  afin d'obtenir une première estimation de la position de la source,

- pour tous les voxels  $V$  dont les deux directions d'incidence sont stockées
  dans  $T$  faire {
  - choisir la direction d'incidence la plus appropriée en utilisant le premier résultat
    sur la position de la source,
  - transformer cette direction en deux plans insérés dans  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ 
}
- recalculer la pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ ,
- obtenir une nouvelle estimation de la position de la source ponctuelle.

```

FIG. 2.17 – 1<sup>er</sup> algorithme de détection d'une source ponctuelle (surface parfaitement diffuse)

$|ax + by + cz + d|$  représente la distance séparant le point du plan. En utilisant les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ , cette estimation effectuée sur le  $i^{ème}$  plan, est représentée par :

$$|\mathcal{M}_i \mathcal{X} - \mathcal{D}_i|$$

avec :

- $\mathcal{M}_i$ , la  $i^{ème}$  ligne de la matrice  $\mathcal{M}$ ,
- $\mathcal{D}_i$ , la  $i^{ème}$  ligne de la matrice  $\mathcal{D}$

Ainsi, si les lignes  $i$  et  $i+1$  des matrices représentent deux plans s'intersectant pour former la droite d'incidence d'un voxel  $V$ , alors la formule suivante :

$$(\mathcal{M}_i \mathcal{X} - \mathcal{D}_i)^2 + (\mathcal{M}_{i+1} \mathcal{X} - \mathcal{D}_{i+1})^2$$

correspond à la distance au carré entre le point d'intersection  $\mathcal{X}$  et la droite d'incidence. Ce calcul vérifie la relation de Pythagore, représentée par la figure 2.18, sur un triangle rectangle :  $(d_1)^2 + (d_2)^2 = (d_3)^2$ .

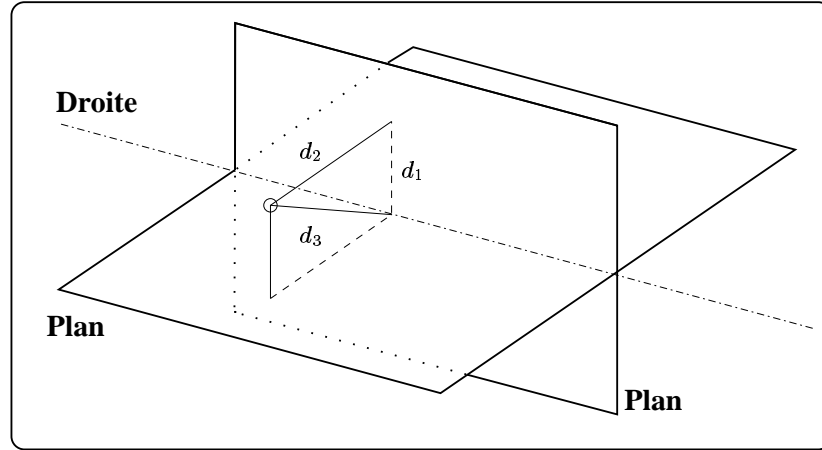


FIG. 2.18 – Distance entre un point et une droite représentée par deux plans orthogonaux. Cette distance vérifie la relation de pythagore :  $(d_1)^2 + (d_2)^2 = (d_3)^2$

Le calcul sur les  $n$  plans s'écrit :

$$\sum_{i=1}^n (\mathcal{M}_i \mathcal{X} - \mathcal{D}_i)^2$$

Ce calcul représente l'erreur de la position estimée de la source en sommant les distances entre cette source et chaque direction d'incidence utilisée.

La valeur de cette erreur dépend fortement de la précision de la première direction d'incidence utilisée. Dès le début de l'algorithme, le voxel ayant la plus forte luminance émise (réfléchi) est choisi et sa normale est considérée comme orientée vers la source lumineuse. L'utilisation d'un nombre limité de couples (direction de réflexion - luminance réfléchi) pour chaque voxel entraîne une imprécision sur l'orientation de cette normale.

La normale de ce voxel est orientée vers la source lumineuse mais elle n'est pas exactement égale à la direction d'incidence. Or, l'estimation de la première direction d'incidence conditionne la suite de l'analyse. Ce premier voxel donne une estimation de  $L_s K_d$  et cette estimation est utilisée dans l'analyse des autres voxels afin de déterminer un angle d'incidence pour chaque voxel.

### Utilisation d'un barycentre

Lors des nombreux tests effectués, nous remarquons que la direction de la source ponctuelle est très bien détectée. Seule la distance séparant la source de l'objet n'est pas toujours correcte.

Ainsi, l'idée est d'estimer le barycentre de l'ensemble de voxels afin de mieux vérifier si la position détectée de la source est dans la direction d'incidence du barycentre. Le barycentre est assimilé à un point au centre de l'objet, représentant cet objet lorsqu'il est observé de très loin.

Après l'estimation du barycentre de l'ensemble des voxels utilisés, expérimentalement il apparaît que la position estimée de la source lumineuse est effectivement sur l'axe barycentre - position réelle de la source.

Le barycentre des voxels est alors utilisé pour améliorer la détection de la source lumineuse. L'idée est d'utiliser un voxel sur cet axe pour représenter le voxel initial  $r_{ef}$  utilisé dans l'algorithme présenté précédemment (la direction d'incidence d'un voxel sur cet axe est connue, c'est



l'axe lui-même).

La direction de cet axe est estimée sans la position réelle de la source puisque deux points connus sont sur cet axe : le barycentre et la position estimée de la source lumineuse.

La récupération d'un voxel  $V_{axe}$  le plus près de cet axe (si possible, sur l'axe) permet d'obtenir une direction d'incidence initiale plus précise que précédemment (la direction de l'axe représente la direction d'incidence de  $V_{axe}$ ). Connaissant la direction  $\vec{I}_{V_{axe}}$  d'incidence et la normale  $\vec{N}_{V_{axe}}$ , l'angle d'incidence  $\theta_{V_{axe}}$ , représenté sur la figure 2.19, est estimé :

$$\cos \theta_{V_{axe}} = \vec{I}_{V_{axe}} \cdot \vec{N}_{V_{axe}}$$

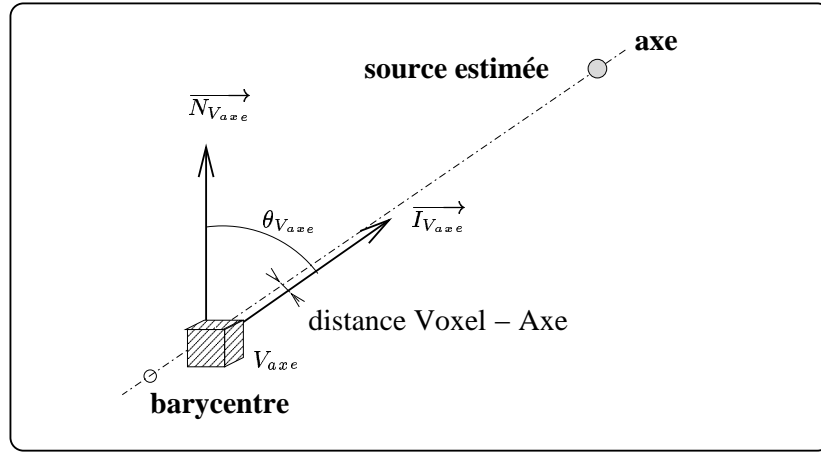


FIG. 2.19 – Voxel sur l'axe barycentre - position estimée de la source. Sa direction d'incidence est celle de l'axe

Le voxel  $V_{axe}$  remplace ainsi le voxel  $V_{ref}$  dans l'algorithme précédent de détection de la position de la source. Une meilleure estimation de  $L_s K_d$  est obtenue :

$$L_s K_d = \frac{L_{V_{axe}}}{\cos \theta_{V_{axe}}}$$

avec :

- $L_s K_d$ , le produit de la luminance de la source par le coefficient diffus de la surface,
- $L_{V_{axe}}$ , la luminance réfléchiée par  $V_{axe}$ .

Les nouvelles données sont plus précises : nouvelle estimation d'une direction d'incidence initiale, et nouvelle estimation de  $L_s K_d$ . Avec ces valeurs, l'algorithme de détection d'une source ponctuelle, détaillé sur la figure 2.17, peut être réutilisé en remplaçant le voxel  $V_{ref}$  par le voxel  $V_{axe}$ .

Une nouvelle estimation de la position de la source ponctuelle est obtenue. L'erreur de cette position de source est recalculée par :

$$\sum_{i=1}^n (\mathcal{M}_i \mathcal{X} - \mathcal{D}_i)^2$$

et l'évaluation de cette erreur est un critère d'appréciation de la qualité de la position estimée de la source.

Si l'erreur évaluée est plus importante que celle évaluée avant l'utilisation du barycentre, alors l'ancienne estimation de la position de la source est conservée. Sinon, la dernière estimation est meilleure, et une nouvelle estimation est réalisée : recalcul de l'axe barycentre - dernière estimation de la position de la source, recherche d'un nouveau voxel sur cet axe, etc .

La figure 2.20 synthétise l'algorithme complet de détection d'une source lumineuse ponctuelle.

```

- utiliser l'algo présenté sur la figure 2.17, page 36 afin d'obtenir une première estimation
  de la position de la source lumineuse, notée  $P_s$ ,
- calculer l'erreur, notée  $E_{P_s}$ , des distances entre  $P_s$  et chaque plan des matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ ,
- Nouvelle_Estimation : Boolean = TRUE;

- tant qu'une Nouvelle_Estimation est demandée faire {
  - calculer l'axe barycentre -  $P_s$ ,
  - rechercher un voxel  $V_{axe}$  situé sur cet axe,
    /* ce voxel  $V_{axe}$  permet d'obtenir une première direction d'incidence plus précise */
    /* ainsi qu'une nouvelle estimation de  $L_s K_d$  */
  - réinitialiser les deux matrices,
  - y insérer les deux plans représentant la première direction d'incidence,
  - utiliser l'algo de la figure 2.17 en supprimant la phase de recherche du voxel  $V_{ref}$ ,
    désormais remplacé par le voxel  $V_{axe}$ ,
    /* une nouvelle estimation de la position de la source est obtenue, notée  $P'_s$  */
  - calculer l'erreur, notée  $E_{P'_s}$ , des distances entre  $P'_s$  et chaque plan
    des matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ ,
  - si  $E_{P'_s} > E_{P_s}$ , alors {
    /* la nouvelle position estimée  $P'_s$  est rejetée */
    /*  $P_s$  est le résultat final de la détection */
    - Nouvelle_Estimation = FALSE;
  }
  - sinon {
    /* la position de la source est améliorée,  $P'_s$  est gardée */
    /* et une nouvelle estimation est envisagée */
    /* modification des variables utilisées dans la prochaine boucle */
    -  $P_s = P'_s$ ; /* utilisation de la nouvelle position estimée */
    -  $E_{P_s} = E_{P'_s}$ ;
  }
}
- retourner la position de la source ponctuelle :  $P_s$ .

```

FIG. 2.20 – Nouvel algorithme de détection d'une source ponctuelle (surface parfaitement diffuse)

Ainsi, à chaque nouvelle itération, l'algorithme utilise la dernière position estimée de la source ponctuelle pour en estimer une nouvelle, plus précise, plus proche de la position réelle. Une estimation du coefficient diffus de la surface est également obtenue, à un facteur près : la luminance émise par la source lumineuse.

Lors de l'exécution de cet algorithme, la position estimée converge rapidement vers un point fixe : la figure 2.21 montre la convergence de la position estimée de la source ponctuelle en 13 itérations, sur un ensemble de 200 voxels analysés.

L'objectif fixé est atteint. La source lumineuse est détectée, sa position est estimée et une valeur

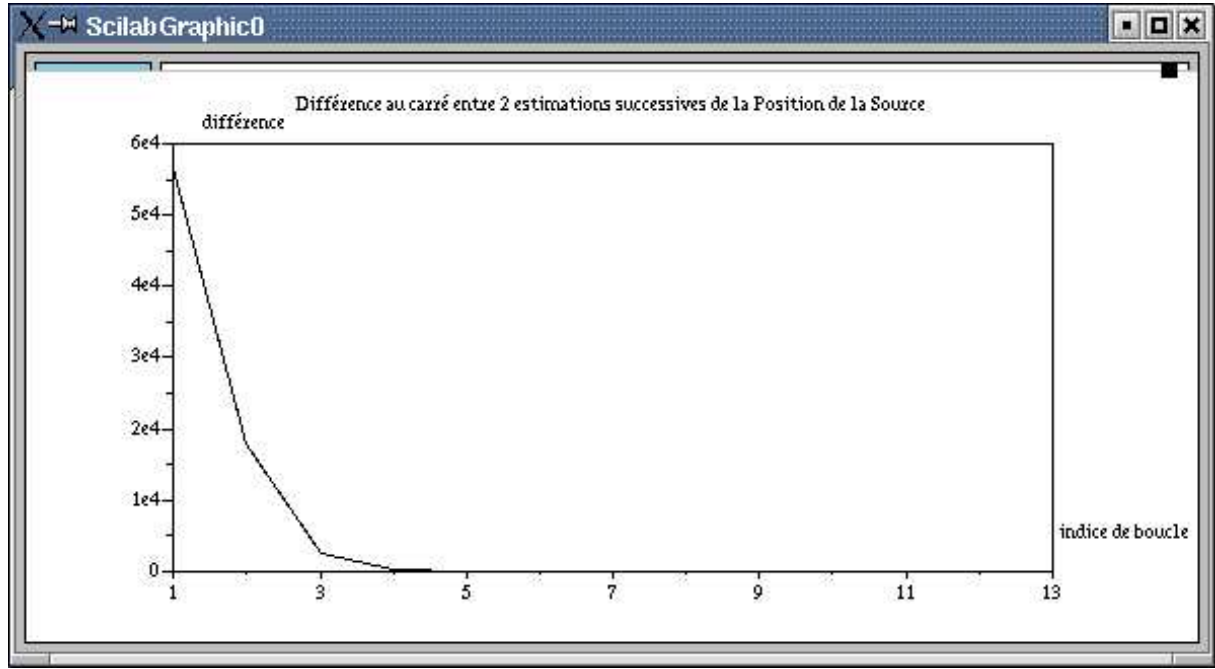


FIG. 2.21 – Différences de position estimée de la source entre deux itérations successives de l’algo

est également obtenue pour le produit  $L_s K_d$ .

L’utilisation d’un barycentre est une méthode pour améliorer la position de la source lumineuse détectée. La convergence de cet algorithme vers “la” meilleure solution n’est pas prouvée mais il converge vers “une” solution meilleure. En effet, tout est mis en oeuvre pour ne pas perdre de temps par des calculs supplémentaires. Tant que la position de la source est améliorée, l’algorithme se poursuit. Dès que la position de la source devient stable (convergence de l’algorithme), l’algorithme se termine. De plus, si la position estimée de la source n’est pas améliorée (par comparaison avec une ancienne estimation), alors l’algorithme se termine.

Dans tous les cas, avec l’utilisation du barycentre, le résultat de la détection de la source est amélioré.

### 2.3.2 Source ponctuelle - surface mixte (diffuse et spéculaire)

Cette analyse est effectuée sous l’hypothèse de l’utilisation de voxels représentant une surface mixte, i.e. une surface au comportement diffus et spéculaire. De plus, la source lumineuse présente lors de l’acquisition est ponctuelle.

La luminance émise par un voxel  $V$ , vers la direction  $\vec{R}_V$ , est recalculée par la formule :

$$L_{\vec{R}_V} = L_s (K_d \cos \theta + K_s \cos^n \phi)$$

avec :

- $\theta$ , l’angle entre la normale  $\vec{N}_V$  et la direction d’incidence  $\vec{I}_V$ ,
- $\phi$ , l’angle entre la direction  $\vec{R}_V$  de réflexion et la direction de réflexion maximale.

La luminance réfléchiée par un voxel dépend de la direction de réflexion, elle varie en fonction de l’angle  $\phi$ .

L'estimation de la position de la source ponctuelle est analogue au cas des surfaces diffuses. La direction d'incidence de chaque voxel de la surface est évaluée. Utilisation des matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  pour stocker deux plans représentant chaque direction d'incidence. Le point d'intersection de cet ensemble de plans est recherché : une estimation de la position de la source lumineuse est ainsi obtenue. Le détail de ces calculs est expliqué par la suite.

### Premier calcul des directions d'incidence

Pour un voxel  $V$  donné, la luminance réfléchie varie selon la direction de réflexion  $\vec{R}_V$  choisie. La luminance la plus importante réfléchie par le voxel  $V$  correspond à une direction  $\vec{R}_V$  confondue avec la direction de réflexion maximale  $\vec{R}_{V,max}$  : cette direction est représentée sur la figure 2.6, page 23. Cette luminance est obtenue pour un angle  $\phi = 0$ , et elle vaut :

$$L_{\vec{R}_{V,max}} = L_s(K_d \cos \theta + K_s)$$

A partir de la direction  $\vec{R}_{V,max}$ , la direction d'incidence  $\vec{I}_V$  est facilement recalculée, c'est le symétrique de  $\vec{R}_{V,max}$  par rapport à la normale  $\vec{N}_V$ .

L'obtention de la direction  $\vec{R}_{V,max}$  est simple : un parcours de l'ensemble des couples (luminance émise - direction de réflexion associée) pour chaque voxel permet d'extraire la direction de réflexion qui émet la luminance la plus importante.

Après la recherche de la direction de réflexion maximale, la direction d'incidence est évaluée, transformée en intersection de deux plans insérés dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  (utilisation de la méthode vue dans la section précédente 2.3.1, sur l'analyse d'une source ponctuelle avec une surface diffuse).

### Première estimation de la position de la source lumineuse

Lorsque l'estimation de la direction d'incidence de tous les voxels est effectuée, la position de la source lumineuse est recherchée : point d'intersection de tous les plans contenus dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$ .

Ce point d'intersection est obtenu, comme précédemment, par utilisation de la matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ , notée  $\mathcal{M}_{pi}$ . La position  $\mathcal{X}$  estimée de la source lumineuse est évaluée par la formule :

$$\mathcal{X} = \mathcal{M}_{pi} \mathcal{D}$$

Malheureusement, le résultat obtenu n'est pas satisfaisant. La direction de réflexion maximale est mal déterminée. En effet, pour un voxel en cours d'analyse, la direction de réflexion maximale est assimilée à la direction de réflexion pour laquelle la luminance émise par ce voxel est la plus importante : cette direction ne correspond pas exactement à la direction de réflexion maximale, elle est seulement proche. Chaque voxel dispose, au maximum, de 500 mesures de luminances dans des directions différentes : un écart important ( $> 5$  degrés) est enregistré entre deux directions proches.

Le résultat de la détection de la position de la source lumineuse peut être amélioré par une estimation plus précise de la direction d'incidence de chaque voxel. Le calcul d'une équation représentant le lobe spéculaire de chaque voxel est un moyen permettant de retrouver, avec plus de fiabilité, la direction de réflexion maximale.

### Utilisation d'un lobe spéculaire

Le lobe spéculaire représente les luminances émises par un ensemble de directions, centrées autour de la direction de réflexion maximale. Dans cet ensemble de directions, les luminances émisent

sont plus importantes que dans les autres directions.

Pour chaque voxel  $V$ , l'équation du lobe spéculaire est évaluée en utilisant seulement quelques directions de réflexions (une dizaine). La direction de réflexion  $\vec{R}_{V,imp}$ , pour laquelle la luminance émise est la plus importante, est utilisée : c'est la direction qui se rapproche le plus de la direction de réflexion maximale  $\vec{R}_{V,max}$ . Ensuite, sont conservées les directions pour lesquelles les luminances émises sont parmi les plus importantes.

Puis les coordonnées des directions de réflexion choisies sont transformées en coordonnées polaires. Le système de coordonnées polaires est centré sur le voxel  $V$  et utilise un repère orthonormé  $(\vec{N}_V, \vec{O}, \vec{P})$  tel que  $\vec{N}_V$  soit la normale du voxel  $V$ . Une direction de réflexion  $\vec{R}$  est définie, en polaire, par deux angles  $(\alpha, \beta)$  représentés sur la figure 2.22, avec :

- $\alpha$ , l'angle entre le projeté  $\vec{R}_{proj}$  de la direction  $\vec{R}$  sur le plan  $(V, \vec{O}, \vec{P})$  et la direction  $\vec{O}$ ,
- $\beta$ , l'angle entre la direction  $\vec{R}$  et la normale  $\vec{N}_V$ .

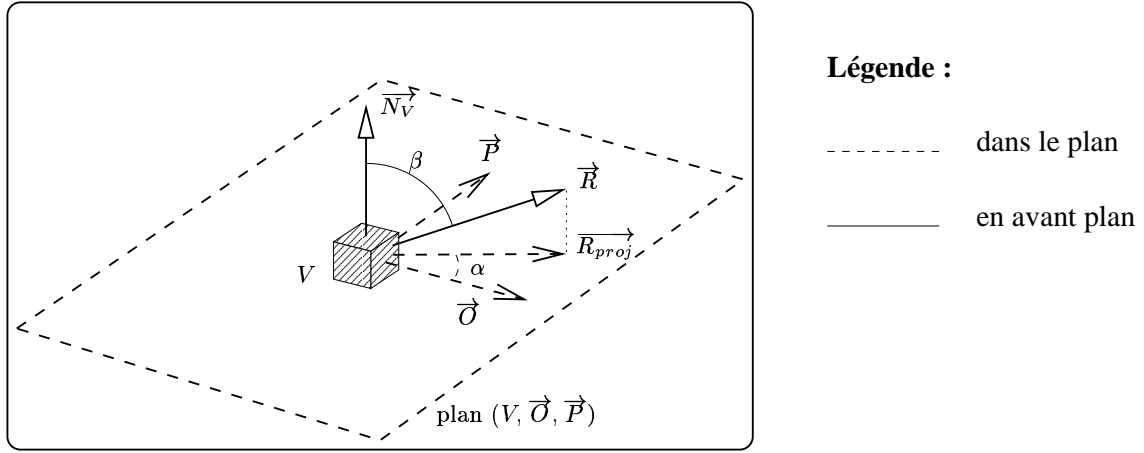


FIG. 2.22 – Représentation d'une direction de réflexion en coordonnées polaires par deux angles :  $\alpha$  et  $\beta$

L'équation du lobe spéculaire définit la luminance émise par le voxel en fonction des angles  $\alpha$  et  $\beta$ . La variation de cette luminance selon chacun des angles ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) représente une parabole 2D :

$$L_{\alpha,\beta} = a(\alpha - \delta_\alpha)^2 + b(\beta - \delta_\beta)^2 + c$$

avec :

- $L_{\alpha,\beta}$ , la luminance émise par le voxel  $V$  dans la direction  $(\alpha, \beta)$ ,
- $(\delta_\alpha, \delta_\beta)$ , la direction de réflexion maximale  $\vec{R}_{max}$  exprimée en coordonnées polaires.

La figure 2.23 est une représentation graphique des solutions de cette équation.

Aucun des cinq coefficients de l'équation ( $a, b, c, \delta_\alpha$  et  $\delta_\beta$ ) n'est connu. Les couples (direction de réflexion - luminance émise), représentés sous la forme  $(\alpha, \beta, L_{\alpha,\beta})$ , sont utilisés comme solutions de l'équation afin de retrouver les cinq coefficients paramétrant cette équation.

Les luminances utilisées  $(\alpha, \beta, L_r(\alpha, \beta))$  peuvent difficilement être solution d'une même équation. Par conséquent, l'erreur entre la luminance utilisée et la luminance recalculée par l'équation est estimée, et vaut :

$$E(\alpha, \beta) = \left( a(\alpha - \delta_\alpha)^2 + b(\beta - \delta_\beta)^2 + c - L_r(\alpha, \beta) \right)^2$$

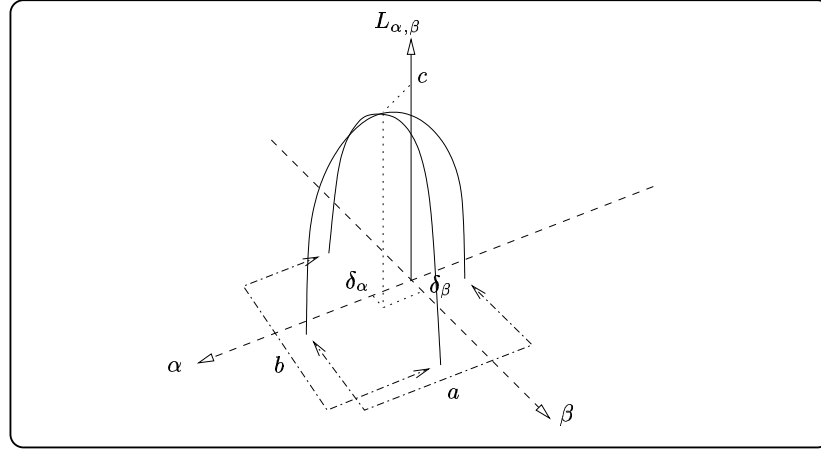


FIG. 2.23 – Représentation des luminances émises selon les angles  $\alpha$  et  $\beta$  (coordonnées polaires de la direction de réflexion).  $L_{\delta_\alpha, \delta_\beta}$  représente la luminance maximale émise par le voxel  $V$ , elle vaut  $c$ . Les autres luminances émises sont plus faibles. Par conséquent,  $a$  et  $b$  sont des coefficients négatifs, représentant la courbure de chaque parabole 2D.

L'estimation des cinq coefficients de l'équation est jugée satisfaisante lorsque l'erreur est minimale sur l'ensemble des couples (direction - luminance) utilisés.

L'estimation des coefficients est réalisée par l'utilisation d'un algorithme d'identification de paramètres, basé sur les courbes d'erreur. Cet algorithme minimise l'erreur évaluée entre les luminances connues et les luminances recalculées pour retrouver les valeurs des cinq coefficients.

### Nouvelle estimation de chaque direction de réflexion maximale

Pour un voxel  $V$ , l'erreur  $E_V$  sur l'ensemble de (direction - luminance) est estimée par :

$$E_V = \sum_{i=1}^n \left( a(\alpha_i - \delta_\alpha)^2 + b(\beta_i - \delta_\beta)^2 + c - L_{\alpha_i, \beta_i} \right)^2$$

La minimisation de l'erreur  $E_V$  permet l'obtention d'une valeur pour les cinq coefficients, et en particulier, pour les coefficients  $\delta_\alpha$  et  $\delta_\beta$  représentant la direction recherchée (direction de réflexion maximale du voxel  $V$  en coordonnées polaires).

L'algorithme d'identification réduit l'erreur  $E_V$  en travaillant sur les dérivées partielles de cette erreur selon chacun des coefficients de l'équation.

L'erreur est évaluée avec des valeurs fixées arbitrairement pour chacun des coefficients. Puis, elle est diminuée en modifiant les valeurs des coefficients. Pour modifier les coefficients, la connaissance du rôle de chaque coefficient sur le résultat de l'erreur est primordiale. L'utilisation des dérivées partielles de l'erreur selon chaque coefficient est un moyen facile de contrôler l'action d'un coefficient sur le calcul de l'erreur.

Une première estimation des valeurs des cinq coefficients est effectuée afin de pouvoir lancer l'étape de minimisation de l'erreur.

- $\delta_\alpha$  et  $\delta_\beta$  représentent la direction de réflexion maximale (direction recherchée) et sont initialisés par la direction  $\vec{R}_{imp}$ , transformée en coordonnées polaires.  $\vec{R}_{imp}$  représente la direction de réflexion pour laquelle la luminance émise est la plus importante (parmi toutes les luminances connues de ce voxel  $V$ ).

- $c$  est initialisée par  $L_{\vec{R}_{imp}}$  car elle représente la luminance émise par la direction de réflexion maximale (initialisée à  $\vec{R}_{imp}$ ).
- $a$  est évalué en utilisant deux directions de réflexions telles que l'angle  $\beta$  de chaque direction soit égal à l'angle  $\delta_\beta$  initialisé. La direction  $\vec{R}_{imp}$  est ainsi utilisée avec une seconde direction de réflexion :

$$\begin{aligned} L_{\delta_\alpha, \delta_\beta} &= c \\ L_{\alpha', \delta_\beta} &= a(\alpha' - \delta_\alpha)^2 + c \end{aligned}$$

D'où,

$$a = \frac{L_{\alpha', \delta_\beta} - L_{\delta_\alpha, \delta_\beta}}{(\alpha' - \delta_\alpha)^2}$$

- Le coefficient  $b$  s'initialise comme  $a$ , en utilisant deux directions de réflexions telles que l'angle  $\alpha$  de chaque direction soit égal à l'angle  $\delta_\alpha$  initialisé. Voici les deux directions utilisées :

$$\begin{aligned} L_{\delta_\alpha, \delta_\beta} &= c \\ L_{\delta_\alpha, \beta''} &= b(\beta'' - \delta_\beta)^2 + c \end{aligned}$$

D'où,

$$b = \frac{L_{\delta_\alpha, \beta''} - L_{\delta_\alpha, \delta_\beta}}{(\beta'' - \delta_\beta)^2}$$

Chaque dérivée partielle de l'erreur est évaluée avec les valeurs initiales des coefficients. Une analyse des dérivées est effectuée :

- si la dérivée partielle de l'erreur selon un coefficient est positive, l'erreur croît en fonction de ce coefficient. Par conséquent, la diminution de la valeur de ce coefficient entraîne une diminution de l'erreur (le même raisonnement peut être tenu dans le cas d'une dérivée partielle négative : le coefficient doit être augmenté pour faire baisser l'erreur),
- si la valeur absolue de la dérivée de l'erreur selon un coefficient est importante, l'erreur varie de façon significative en fonction de ce coefficient. Par conséquent, la modification de la valeur de ce coefficient entraîne une rapide diminution de l'erreur.

Après l'évaluation des dérivées partielles de l'erreur, le coefficient à modifier est choisi. La dérivée partielle selon ce coefficient représente la dérivée dont la valeur absolue est la plus forte. Ce coefficient est augmenté ou diminué en fonction du signe de la dérivée partielle. Puis, les dérivées partielles sont réévaluées avec la nouvelle valeur pour ce coefficient. La modification de ce coefficient entraîne, en général, une diminution de l'erreur. Puis un nouveau choix de coefficient à modifier est effectué, et ainsi de suite.

Les modifications successives des coefficients entraînent une diminution des dérivées partielles et surtout une diminution de l'erreur. Lorsque toutes les dérivées partielles avoisinent le zéro, l'erreur est minimisée. Ainsi, un minimum local est trouvé pour la fonction d'erreur selon chacun des coefficients.

Quelquefois, la modification des valeurs des coefficients n'entraîne pas de diminution d'erreur. La figure 2.24 illustre le cas d'un coefficient choisi plusieurs fois, bloquant l'algorithme d'identification.

Sur cet exemple, le pas de déplacement fixe empêche l'algorithme de converger. Pour palier ce problème, le pas de déplacement est modifié en cours d'algorithme. La figure 2.25 montre l'utilisation d'un pas variant en fonction de la situation.

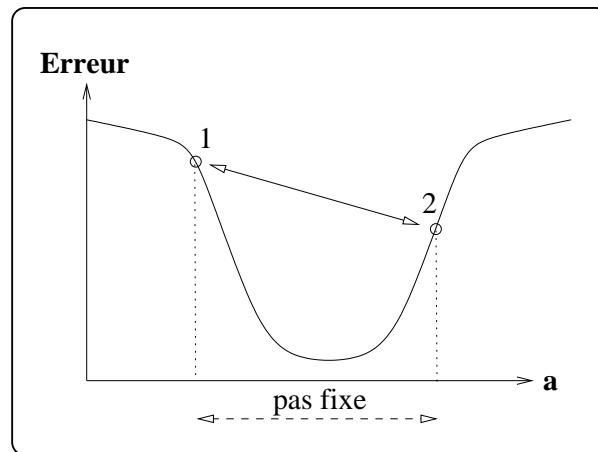


FIG. 2.24 – La valeur absolue de la dérivée partielle selon  $a$  est la plus importante, par conséquent le coefficient  $a$  (situé en position 1) est modifié. La dérivée selon  $a$  est négative,  $a$  est donc augmenté du pas de déplacement fixé en début d'algorithme (il figure sur le schéma). Ce pas de déplacement est trop grand, si bien que le coefficient  $a$  se retrouve en position 2. La valeur absolue de la dérivée partielle de l'erreur selon  $a$  est toujours la plus forte. Cette dérivée partielle est positive, la valeur de  $a$  est diminuée du même pas. Le coefficient  $a$  est de retour à la position 1. L'algorithme d'identification se répète indéfiniment sans jamais diminuer la valeur de l'erreur.

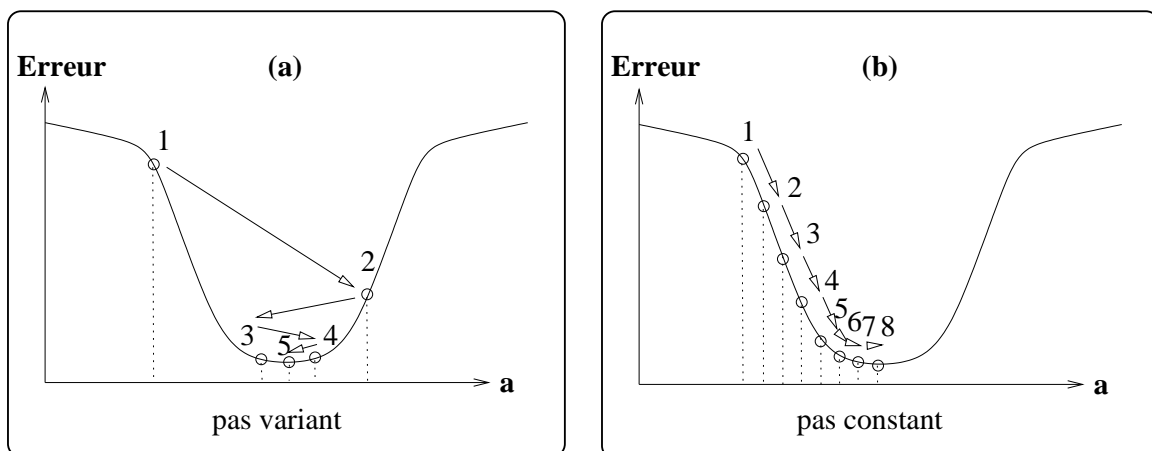


FIG. 2.25 – Le pas de déplacement varie suivant le cas de figure. Sur les deux figures, la valeur absolue de la dérivée partielle selon  $a$  est nettement plus importante que celle des autres dérivées. Ainsi, le coefficient  $a$  est modifié plusieurs fois successivement. La figure (a) illustre le cas où la dérivée partielle change de signe à chaque modification du coefficient  $a$ . Lorsque la dérivée change de signe, le pas de déplacement est divisé par deux pour éviter le cycle présenté sur la figure 2.24. Lors de changements fréquents de signe de la dérivée (figure (a)), l'estimation de l'erreur converge rapidement vers un minimum local pour le coefficient  $a$ . Sur la figure (b), le pas de déplacement est faible. Ainsi, la modification de  $a$  diminue faiblement l'erreur, et le signe de la dérivée reste négatif. Dans cette situation, le pas de déplacement reste constant tant que le signe de la dérivée ne change pas. L'estimation de l'erreur diminue progressivement jusqu'à atteindre un minimum local pour le coefficient  $a$ .



Dans l'exemple (b) de la figure 2.25, le pas de déplacement est constant, permettant d'obtenir assez rapidement un minimum local. Sur cette figure (b), si le pas de déplacement avait été systématiquement divisé par deux, alors le minimum local n'aurait jamais été atteint.

Cette modification du pas de déplacement assure la convergence de l'erreur vers un minimum local. Après plusieurs modifications de valeurs de coefficients, l'erreur est réellement diminuée. En effet, aucun cycle infini n'apparaît lors de la modification de coefficients. Le seul cycle existant est représenté sur la figure 2.26.

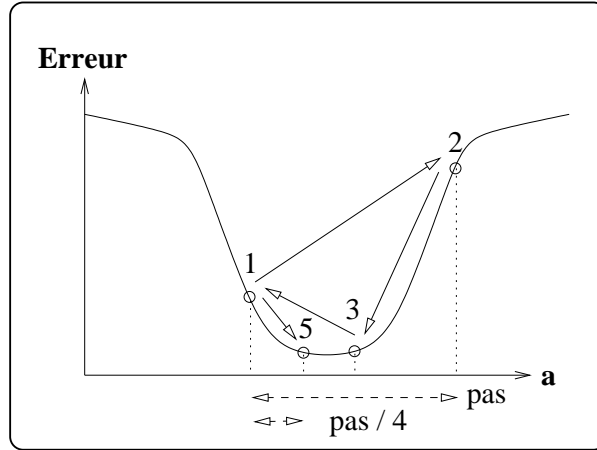


FIG. 2.26 – Un cycle apparaît lors de modifications successives du coefficient  $a$ , mais ce cycle n'est pas renouvelé. Au début de l'algorithme, le coefficient  $a$  est situé en position 1. Ce coefficient est augmenté d'un pas de déplacement, il atteint la position 2. La dérivée de l'erreur change de signe (elle est positive), le pas de déplacement est divisé par deux, et le coefficient  $a$  est diminué pour rejoindre la position 3. Ici, la dérivée est toujours positive,  $a$  est diminué à nouveau pour retourner en position 1. Un cycle vient d'être effectué, l'erreur n'est pas diminuée en trois modification successives de  $a$ . Mais la dérivée redevient négative, le pas de déplacement est encore divisé par deux, et  $a$  est augmenté pour atteindre la position 5 (et non la position 2). A ce moment-là, le cycle n'est pas renouvelé, et l'erreur est diminuée.

Lorsque l'erreur est minimisée, les coefficients  $\delta_\alpha$  et  $\delta_\beta$  correspondent à la direction recherchée : la direction de réflexion maximale du voxel  $V$ , exprimée en coordonnées polaires.

Cette direction est transformée en coordonnées cartésiennes puis est utilisée, avec la normale de  $V$ , afin de retrouver la direction d'incidence du voxel.

Le travail n'est pas effectué en coordonnées polaires, car le système de coordonnées polaires est local au voxel en cours d'analyse. Ainsi, si chaque direction d'incidence est définie en coordonnées polaires, l'intersection de ces directions d'incidence ne peut pas être estimée (utilisation de directions provenant de plusieurs systèmes de coordonnées différents). Par conséquent, la conversion des directions d'incidence dans un système absolu (indépendant du voxel) est indispensable.

La direction d'incidence est transformée en intersection de deux plans orthogonaux, insérés dans les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  vues dans les sections précédentes.

Puis le calcul de la direction d'incidence est effectué sur chaque autre voxel (utilisation de l'algorithme d'identification sur chaque voxel afin d'en extraire la direction de réflexion maximale). La position de la source ponctuelle est retrouvée par l'utilisation de la matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ , comme précédemment.

La synthèse de l'algorithme d'identification utilisé pour retrouver la direction de réflexion maxi-

male est représentée sur la figure 2.27.

```

- récupérer des couples (direction - luminance) représentant le lobe spéculaire,
/* ces directions pointent vers la direction de réflexion spéculaire */
- transformer ces directions gardées en coordonnées polaires,
/* ces directions sont utilisées pour recalculer l'équation du lobe spéculaire */
/* un calcul d'erreur est effectué entre la luminance émise dans ces directions */
/* et la luminance recalculée */
/* utilisation de l'algorithme d'identification des coefficients */
- initialiser les 5 coefficients à recalculer, utilisés pour estimer l'erreur,
- définir un pas de déplacement pour chacun de ces coefficients, susceptibles d'être modifiés,
- calculer les dérivées de l'erreur selon chaque coefficient,
/* le calcul des dérivées utilise les (direction - luminance) ainsi que les estimations des 5 coefficients */
- récupérer la dérivée dont la valeur absolue est maximale,
/* le coefficient associé à cette dérivée doit être modifié */
- garder le nouveau sens de déplacement de ce coefficient,

- tant qu'il faut modifier au moins un coefficient faire {
    /* se traduit par tant que la dérivée choisie n'est pas nulle */
    /* et que le pas de déplacement du coefficient à modifier n'est pas nul */
    /* lorsque le pas est nul, le coefficient n'est plus modifié. L'erreur est ainsi minimisée */
    - modifier le coefficient en fonction du signe de la dérivée et du pas de déplacement,
    - recalculer les dérivées de l'erreur selon chaque coefficient,
    - récupérer la nouvelle dérivée dont la valeur absolue est maximale,
    - comparer le sens de déplacement du coefficient à modifier avec le dernier sens
      de déplacement effectué sur ce coefficient,
    - si le déplacement a lieu dans le même sens alors {
        - ne pas modifier le pas de déplacement de ce coefficient
    }
    - sinon {
        - diviser par 2 le pas de déplacement de ce coefficient
    }
    - garder le nouveau sens de déplacement de ce coefficient
}
/* l'erreur est minimisée */
- transformer les deux coefficients  $\delta_\alpha$  et  $\delta_\beta$ , en coordonnées cartésiennes,
/* ils représentent la direction de réflexion maximale */
- calculer la direction d'incidence en utilisant la normale du voxel.

```

FIG. 2.27 – Algorithme d'identification des paramètres permettant de recalculer la direction de réflexion maximale d'un voxel

L'estimation de la direction de réflexion maximale de chaque voxel par un algorithme d'identification des paramètres permet de détecter la position de la source en présence de surfaces mixtes. Par contre, aucune estimation des coefficients de la surface n'est obtenue (cette estimation est réalisée plus tard, elle est développée dans la section 2.4, page 50).

L'algorithme d'identification ne donne pas toujours la direction de réflexion maximale. C'est un problème classique en identification des paramètres, l'erreur obtenue en fin d'algorithme est un minimum local pour chaque paramètre mais pas toujours un minimum global. Une amélioration du minimum estimé nécessite une analyse complémentaire vérifiant l'obtention du minimum global. Cette analyse n'est pas effectuée, elle demande du temps de calcul supplémentaire pour améliorer quelque peu la direction de réflexion maximale retrouvée.

L'analyse des sources lumineuses est poursuivie avec la détection d'une source directionnelle. Lors de cette nouvelle analyse, l'objectif est de retrouver la direction de la source (et non sa position supposée infinie).

### 2.3.3 Source directionnelle - surface diffuse

L'analyse fait l'hypothèse de voxels représentant une surface parfaitement diffuse, éclairée par une source directionnelle.

Ainsi, la luminance réfléchie par un voxel  $V$  est indépendante de la direction de réflexion, elle est estimée par :

$$L_V = L_s K_d \cos \theta_V$$

avec  $\theta_V$ , l'angle entre la normale  $\vec{N}_V$  du voxel et la direction d'incidence  $\vec{I}$  recherchée.

Cette direction d'incidence est la même pour tous les voxels puisque la seule source lumineuse présente est une source directionnelle.

L'estimation de la luminance réfléchie par un voxel  $V$  est réécrite sous la forme :

$$\begin{aligned} L_V &= L_s K_d \vec{N}_V \cdot \vec{I} \\ &= \vec{N}_V \cdot \vec{X} \end{aligned}$$

avec  $\vec{X} = L_s K_d \vec{I}$ .

$\vec{X}$  est un vecteur constant, indépendant de tout voxel. Il est présent dans l'équation de la luminance réfléchie par chaque voxel.

Par conséquent,  $\vec{X}$  est écrit sous la forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} N_{V,x} & N_{V,y} & N_{V,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_x \\ X_y \\ X_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_V \end{pmatrix}$$

où sous forme plus compacte :

$$\mathcal{M}\mathcal{X} = \mathcal{D}$$

avec :

- $\mathcal{M}$ , une matrice sur trois colonnes, stockant la normale du voxel,
- $\mathcal{X}$ , la matrice résultat, représentant les coordonnées du vecteur  $\vec{X}$ ,
- $\mathcal{D}$ , une matrice colonne, stockant la luminance réfléchie par le voxel (luminance indépendante de la direction de réflexion pour une surface diffuse).

L'équation de luminance de chaque voxel peut être représentée de la même manière. Comme toutes les équations de luminance utilisent le même vecteur  $\vec{X}$ , la normale de chaque voxel est stockée dans une ligne de la matrice  $\mathcal{M}$  et sa luminance dans une ligne de  $\mathcal{D}$ . Voici une représentation plus détaillée du système obtenu :

$$\begin{pmatrix} N_{V_1,x} & N_{V_1,y} & N_{V_1,z} \\ N_{V_2,x} & N_{V_2,y} & N_{V_2,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{V_m,x} & N_{V_m,y} & N_{V_m,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_x \\ X_y \\ X_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{V_1} \\ L_{V_2} \\ \vdots \\ L_{V_m} \end{pmatrix}$$

Parmi ces trois matrices, seule la matrice  $\mathcal{X}$  est indéterminée. Chaque ligne des matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  représente les données d'un même voxel (sa normale et sa luminance réfléchie).

Ce système matriciel est résolu en utilisant de nouveau une matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ . La matrice  $\mathcal{M}$  contient plus de lignes (autant que de le nombre de voxels utilisés, soit  $m$ ) que de colonnes (seulement 3), elle n'admet généralement pas de matrice inverse. En revanche, l'utilisation de la matrice pseudo-inverse de  $\mathcal{M}$ , notée  $\mathcal{M}_{pi}$ , résout le problème. Ainsi,  $\mathcal{X}$  est estimée par :

$$\mathcal{X} = \mathcal{M}_{pi} \mathcal{D}$$

La direction d'incidence est un vecteur normé. Par conséquent, le produit de la luminance réfléchie par la source, par le coefficient diffus de la surface est obtenu :

$$L_s K_d = ||\vec{X}||$$

La direction d'incidence est extraite de  $\vec{X}$  en normant ce vecteur :

$$\vec{I} = \frac{\vec{X}}{L_s K_d}$$

L'objectif fixé est parfaitement atteint par cette analyse. La direction de la source lumineuse est obtenue pour une surface diffuse, ainsi que le coefficient diffus de la surface, à un facteur près : la luminance émise par la source lumineuse.

### 2.3.4 Source directionnelle - surface mixte (diffuse et spéculaire)

Cette analyse est effectuée sous l'hypothèse de l'utilisation de voxels représentant une surface mixte, i.e. au comportement diffus et spéculaire.

L'objectif est de détecter la direction de la source lumineuse. La luminance réfléchie par un voxel  $V$ , vers la direction  $\vec{R}_V$ , est recalculée en fonction des angles  $\theta$  et  $\phi$  :

$$L_{\vec{R}_V} = L_s (K_d \cos \theta + K_s \cos^n \phi)$$

La luminance réfléchie par un voxel croît lorsque la valeur de l'angle  $\phi$  diminue. Cette luminance est maximale quand la direction de réflexion  $\vec{R}_V$  est confondue avec la direction de réflexion maximale, appelée direction de réflexion miroir : cette direction apparaît sur la figure 2.6, représentant le lobe de réflexion spéculaire.

Pour chaque voxel  $V$ , la direction de réflexion maximale  $\vec{R}_{V,max}$  est recherchée. Cette direction est choisie parmi l'ensemble des couples (direction - luminance) disponibles pour chaque voxel. La direction, pour laquelle la luminance émise par le voxel est la plus importante, est considérée comme la direction de réflexion maximale. À partir de cette direction et de la normale  $\vec{N}_V$  de ce voxel, est calculée la direction d'incidence  $\vec{I}_V$ .

La direction d'incidence de chaque voxel est calculée. La direction de la source lumineuse est obtenue en moyennant les directions d'incidence des  $m$  voxels :

$$\vec{I} = \frac{\sum_{i=1}^m \vec{I}_{V_i}}{m}$$

La direction de réflexion maximale obtenue pour chacun des voxels n'est pas très précise, mais la moyenne effectuée sur les directions d'incidence de chaque voxel permet d'atténuer cette imprécision et donne des résultats corrects : l'angle de déviation entre la direction obtenue et la direction réelle de la source est inférieur à 1 degré.

Ceci évite d'utiliser l'équation du lobe spéculaire de chaque voxel pour obtenir une direction de réflexion maximale plus précise. L'identification des coefficients de cette équation donne de

bons résultats mais est très coûteuse en temps de calcul. Dans le cas de détection d'une source directionnelle, l'utilisation de l'algorithme d'indentification des paramètres du lobe spéculaire n'est pas nécessaire.

La détection de source directionnelle est effectuée avec succès. La direction de la source est estimée aussi bien avec des surfaces diffuses qu'avec des surfaces mixtes.

L'analyse en présence de source surfacique n'est pas réalisée pendant ce stage. L'étude de sources surfaciques demande une analyse plus précise, similaire à l'utilisation de plusieurs sources simultanément.

La principale préoccupation, maintenant, est la mise en corrélation des résultats obtenus lors de ces diverses analyses. Pour chaque analyse de source, l'erreur en termes de luminances réfléchies est évaluée et permet de prendre des décisions sur la validité des résultats obtenus.

## 2.4 Estimation de l'erreur

Chacune des analyses détaillées dans les sections précédentes travaille sous certaines hypothèses : tel type de source lumineuse, tel type de réflexion sur la surface. L'évaluation de l'erreur commise en supposant ces conditions permet de déduire la phase d'analyse donnant les meilleurs résultats.

L'évaluation de l'erreur s'effectue par estimation des luminances réfléchies par chaque voxel. Les luminances sont estimées, puis comparées avec les luminances connues provenant de l'ensemble des couples (direction - luminance) de chaque voxel.

### 2.4.1 Surfaces diffuses

Lorsque l'hypothèse d'une surface de l'objet parfaitement diffuse est faite, l'erreur des luminances est estimée par :

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{NbLuminances_{V_i}} \left( L_s K_d \cos \theta - L_{\overrightarrow{R_{V_i,j}}} \right)^2$$

avec :

- $L_{\overrightarrow{R_{V_i,j}}}$ , la luminance réfléchie par le voxel  $V_i$  dans la direction  $\overrightarrow{R_{V_i,j}}$ ,
- $m$ , le nombre de voxels utilisés lors de l'analyse,
- $NbLuminances_{V_i}$ , le nombre de couples (direction - luminance) connus pour le voxel  $V_i$ .

Une estimation de  $L_s K_d$  est donnée lors de l'analyse d'une surface diffuse, que ce soit pour détecter une source ponctuelle (voir section 2.3.1) ou une source directionnelle (voir section 2.3.3).

Cette estimation de  $L_s K_d$  peut être utilisée directement pour estimer la luminance réfléchie dans chacune des directions et ainsi évaluer l'erreur des luminances.

Mais une autre utilisation de  $L_s K_d$  est choisie. L'erreur des luminances est minimisée en modifiant la valeur  $L_s K_d$ . Un algorithme d'identification des paramètres (ici,  $L_s K_d$ ) est utilisé, comme dans la section 2.3.2, par estimation de la valeur de la dérivée partielle de l'erreur selon  $L_s K_d$ . Ainsi, le seul coefficient à déterminer ( $L_s K_d$ ) est obtenu.

Pour amorcer la minimisation, l'algorithme utilise des valeurs initiales des coefficients recherchés. La valeur de  $L_s K_d$  obtenue pendant la phase de détection de la source lumineuse devient la valeur initiale utilisée pour débiter l'algorithme.

La minimisation de l'erreur permet d'obtenir une évaluation fiable de l'erreur, mais également une estimation précise du produit du coefficient diffus de la surface par la luminance émise depuis la source lumineuse.

### 2.4.2 Surfaces mixtes (diffuses et spéculaires)

L'erreur des luminances est évaluée par :

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{NbLuminances_{V_i}} \left( L_s K_d \cos \theta + L_s K_s \cos^n \phi - L_{\overrightarrow{R_{V_i,j}}} \right)^2$$

Dans le cas d'une surface mixte, aucune estimation des coefficients de la surface n'est obtenue lors de la phase d'analyse de la source lumineuse (qu'elle soit ponctuelle ou directionnelle).

L'estimation de l'erreur  $E$  des luminances émises ne peut être effectuée sans les valeurs des coefficients  $L_s K_d$ ,  $L_s K_s$  et  $n$ .

Pour palier ce problème, l'algorithme d'identification des paramètres de cette erreur est à nouveau utilisé. Cet algorithme permet d'estimer les valeurs des trois coefficients ( $L_s K_d$ ,  $L_s K_s$  et  $n$ ) tout en minimisant l'erreur des luminances. La minimisation demande une valeur initiale pour les trois coefficients cités ci-dessus. Ensuite, l'algorithme utilise ces valeurs initiales pour évaluer l'erreur, et il modifie les coefficients de manière à réduire l'erreur des luminances.

**L'initialisation de  $L_s K_d$**  est effectuée par l'utilisation, dans chaque voxel, d'une direction de réflexion n'appartenant pas au lobe spéculaire. Dans chaque voxel, parmi l'ensemble des (direction - luminance), la luminance minimale réfléchie est recherchée, ainsi que sa direction de réflexion : la luminance réfléchie dans cette direction ne doit pas contenir de composante spéculaire. La vérification est effectuée par l'estimation de l'angle  $\phi$  : angle entre la direction de réflexion maximale et la direction de réflexion choisie. Si cet angle est supérieur à  $\frac{\pi}{2}$ , la direction choisie est correcte et l'évaluation de  $L_s K_d$  sur le voxel  $V_i$  est effectuée par :

$$(L_s K_d)_{V_i} = \frac{L_{V_i,min}}{\cos \theta_{V_i}}$$

avec :

- $L_{V_i,min}$ , la luminance minimale réfléchie par le voxel  $V_i$ ,
- $\theta_{V_i}$ , l'angle d'incidence du voxel  $V_i$ .

Ce calcul est réalisé sur tous les voxels le permettant, et la valeur d'initialisation de  $L_s K_d$  est obtenue en effectuant une moyenne sur toutes les valeurs estimées :

$$L_s K_d = \frac{\sum_{i=1}^m (L_s K_d)_{V_i}}{m}$$

avec  $m$ , le nombre de voxels permettant l'évaluation de  $L_s K_d$ .

**L'initialisation de  $L_s K_s$**  utilise l'évaluation de  $L_s K_d$  pour être effectuée. Le calcul de  $L_s K_s$  est similaire à celui de  $L_s K_d$  effectué précédemment, excepté la direction de réflexion recherchée, pour chaque voxel, appartenant au lobe spéculaire. Cette direction est déterminée en recherchant la direction pour laquelle la luminance réfléchie est la plus importante. Cette direction est correcte si l'angle  $\phi$  est inférieur à  $\frac{\pi}{2}$ , et  $L_s K_s$  est évaluée sur le voxel  $V_i$  en supposant l'exposant de réflexion spéculaire  $n = 1$  :

$$(L_s K_s)_{V_i} = \frac{L_{V_i,max} - L_s K_d \cos \theta_{V_i}}{\cos \phi_{V_i}}$$

avec  $L_{V_i, max}$ , la luminance maximale réfléchie par le voxel  $V_i$ .

Comme précédemment, ce calcul est réalisé sur tous les voxels et la valeur d'initialisation de  $L_s K_s$  est calculée par une moyenne :

$$L_s K_s = \frac{\sum_{i=1}^m (L_s K_s)_{V_i}}{m}$$

**L'initialisation de  $n$** , l'exposant de réflexion spéculaire, fixe arbitrairement sa valeur à 1, valeur déjà utilisée lors de l'estimation de  $L_s K_s$ .

L'algorithme d'identification recherche un minimum local de l'erreur, en modifiant les trois coefficients. La minimisation de l'erreur des luminances est la méthode utilisée pour retrouver les trois coefficients caractérisant la surface. Cette évaluation n'est possible qu'après détection de la source lumineuse. Les coefficients diffus et spéculaire ne sont pas obtenus directement, ils dépendent toujours de la luminance émise  $L_s$  par la source lumineuse.

L'évaluation de l'erreur permet de déterminer l'analyse de source lumineuse donnant les meilleurs résultats. Son utilisation est expliquée plus en détails dans la section suivante.

## 2.5 Algorithme de détection

L'algorithme principal joue le rôle d'arbitre dans la détection de source lumineuse, en minimisant le nombre d'analyses devant être effectuées, puis en comparant les résultats obtenus dans chaque analyse. Il décide enfin de choisir l'analyse la plus pertinente. Rappelons que les quatres analyses développées dans la section 2.3 sont indépendantes, elles ne communiquent aucun résultat entre elles.

### 2.5.1 Algorithme “brut”

Le premier algorithme utilisé effectue, successivement, toutes les analyses de source lumineuse, détaillées dans la section 2.3. Quatres analyses sont développées :

- la détection d'une source ponctuelle en faisant l'hypothèse d'une surface purement diffuse,
- toujours la détection d'une source ponctuelle mais avec l'hypothèse d'une surface mixte (spéculaire et diffuse),
- la détection d'une source directionnelle, avec une surface purement diffuse,
- une surface mixte (spéculaire et diffuse), en présence d'une source directionnelle.

Puis, l'erreur sur les luminances est évaluée pour chaque analyse. L'estimation de l'erreur retourne une erreur minimale pour chaque analyse, en ajustant la valeur des coefficients de la surface (utilisation d'un algorithme d'identification, voir section 2.4).

L'algorithme choisit ensuite l'analyse donnant l'erreur la plus faible et confirme le résultat estimé par l'analyse choisie comme le plus réaliste parmi les analyses qu'il est capable d'effectuer.

Ce résultat doit être validé. En effet, un résultat est choisi parmi les quatres estimations, mais il n'est peut-être pas correct.

L'algorithme décide, dans le cas de la détection d'une source directionnelle, que le résultat fourni (la direction de la source) est toujours correct. En effet, la détection de la direction d'une source pose peu de problème, elle est très fiable.

En revanche, l'estimation de la position de la source ne fournit pas toujours un résultat correct. Très souvent, lorsque la source est éloignée de l'objet, la position estimée est différente de la position réelle. En général, la position estimée est plus proche de l'objet que la position réelle.

Une méthode est proposée pour l'évaluation de la précision de la position de la source lumineuse. Chaque détection de source ponctuelle, sur une surface parfaitement diffuse ou mixte, estime une direction d'incidence pour chaque voxel, puis détermine un point d'intersection de toutes ces droites, représentant la position de la source.

La précision de la position est évaluée en calculant la distance moyenne séparant le point d'intersection de chacune des droites d'incidence. Cette estimation utilise les matrices  $\mathcal{M}$  et  $\mathcal{D}$  stockant les directions d'incidence de chaque voxel (voir sections 2.3.1 et 2.3.2).

L'évaluation sur les  $n$  lignes des matrices donne une erreur des distances :

$$E_{distances} = \sum_{i=1}^n (\mathcal{M}_i \mathcal{X} - \mathcal{D}_i)^2$$

avec  $\mathcal{X}$  la matrice représentant la position estimée de la source lumineuse.

Le détail de l'estimation est inscrit dans le paragraphe *Erreur de la position calculée* à la section 2.3.1. Ainsi, une détection de source ponctuelle est validée si l'erreur des distances est inférieure à un seuil. Ce seuil est fixé lors de la phase d'expérimentation, section 3.3.

Pour accélérer les temps de calcul, un prétraitement est réalisé avant d'effectuer les analyses, détectant le type de surface de l'objet.

### 2.5.2 Utilisation du type de surface

Au lieu d'effectuer les quatre analyses de source lumineuse, un prétraitement est réalisé pour l'ensemble des voxels afin de détecter le type de surface de l'objet. La connaissance de la surface restreint l'analyse à l'étude de deux cas seulement : la détection d'une source ponctuelle ou directionnelle.

La détection du type de surface (diffuse ou mixte) est réalisée par une estimation de l'écart-type des luminances. Pour une surface parfaitement diffuse, l'écart-type est nul puisqu'un voxel réfléchit la même luminance dans toutes les directions. Et, plus la surface est spéculaire, plus l'écart-type augmente. Voici le calcul d'écart-type sur un voxel  $V$  :

$$ET_V = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left( L_{\vec{R}_{V,j}} - L_{V,moy} \right)^2}{m}}$$

avec  $L_{V,moy} = \frac{\sum_{j=1}^m L_{\vec{R}_{V,j}}}{m}$ , la luminance moyenne réfléchie par le voxel  $V$ .

L'écart-type des luminances est réalisé sur tous les voxels :

$$ET = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{NbLuminances_{V_i}} \left( L_{\vec{R}_{V_i,j}} - L_{V_i,moy} \right)^2}{\sum_{i=1}^n NbLuminances_{V_i}}}$$

Les résultats d'estimation de l'écart-type des luminances obtenus sur des échantillons de 2000 voxels sont représentés dans le tableau 2.1.



$K_s$	$0.1$	$0.2$	$0.4$	$0.8$
$L_s$				
$1$	0.033	0.066	0.133	0.266
$10$	0.33	0.66	1.32	2.66

$K_s$	$0.1$	$0.2$	$0.4$	$0.8$
$L_s$				
$1$	0.033	0.066	0.133	0.265
$10$	0.33	0.66	1.33	2.66

TAB. 2.1 – Ecart-type des luminances avec  $n = 1$  et à gauche :  $K_d = 0$  ; à droite :  $K_d = 0.5$ 

Pour un exposant de réflexion spéculaire  $n$  fixé,  $ET$  est proportionnel au produit  $L_s K_s$  et indépendant du coefficient diffus  $K_d$ . Le coefficient de spécularité  $K_s$  intervient dans l'estimation de l'écart-type mais il est couplé avec la luminance  $L_s$  inconnue, émise par la source. Par conséquent, aucune estimation exacte de  $K_s$  ne peut être effectuée.

La contribution de la composante  $L_s$  dans l'évaluation de l'écart-type est annulée en utilisant l'écart-type normalisé  $ETN$ . Cet écart-type normalisé divise chaque différence, entre une luminance réfléchie dans une direction et la luminance moyenne du voxel, par cette luminance moyenne du voxel.

L'écart-type normalisé des luminances est effectué sur l'ensemble des voxels :

$$ETN = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{NbLuminances_{V_i}} \left( \frac{L_{\vec{R}_{V_i,j}} - L_{V_i,moy}}{L_{V_i,moy}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n NbLuminances_{V_i}}}$$

Les résultats obtenus sur  $ETN$  figurent dans les tableaux 2.2 et 2.3.

$K_s$	$0.0125$	$0.025$	$0.05$	$0.1$	$0.2$	$0.4$
$K_d$						
$0.05$	0.26	0.37	0.50	0.64	0.77	0.87
$0.1$	0.19	0.26	0.37	0.50	0.64	0.77
$0.2$	0.14	0.18	0.27	0.37	0.49	0.64
$0.4$	0.10	0.14	0.19	0.27	0.37	0.50

TAB. 2.2 – Ecart-type normalisé des luminances avec  $n = 1$  et  $L_s = 1$ 

$K_s$	$0.0125$	$0.025$	$0.05$	$0.1$	$0.2$	$0.4$
$K_d$						
$0.05$	0.26	0.37	0.49	0.64	0.77	0.87
$0.1$	0.19	0.27	0.36	0.49	0.64	0.77
$0.2$	0.14	0.19	0.26	0.37	0.50	0.64
$0.4$	0.10	0.13	0.19	0.27	0.37	0.50

TAB. 2.3 – Ecart-type normalisé des luminances avec  $n = 1$  et  $L_s = 10$ 

Ces deux tableaux indiquent des résultats similaires pour des valeurs  $L_s$  différentes. Par conséquent, la luminance émise par la source n'influe pas sur la valeur de l'écart-type normalisé.

L'écart-type normalisé évolue en fonction du rapport  $\frac{K_s}{K_d}$  : les diagonales de chaque tableau ont un rapport  $\frac{K_s}{K_d}$  constant, elles enregistrent un  $ETN$  identique. Le coefficient spéculaire est le seul, parmi  $K_s$  et  $K_d$ , à faire évoluer  $ETN$  : il représente le lobe spéculaire dans la fonction de

calcul de luminance. Plus le lobe spéculaire est grand par rapport aux luminances réfléchies dans les autres directions, plus  $ETN$  augmente : d'où une dépendance de  $ETN$  au rapport  $\frac{K_s}{K_d}$ .

L'écart-type normalisé varie également en fonction de l'exposant de réflexion spéculaire  $n$ . L' $ETN$  estimé pour des valeurs extrémales de  $n$  est représenté dans les tableaux 2.4 et 2.5.

$K_s$ $K_d$	0.0125	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
0.05	0.29	0.39	0.55	0.76	1.05	1.36
0.1	0.20	0.29	0.40	0.56	0.76	1.04
0.2	0.15	0.21	0.28	0.40	0.56	0.77
0.4	0.11	0.15	0.21	0.28	0.40	0.56

TAB. 2.4 – Ecart-type normalisé des luminances avec  $n = 10$  et  $L_s = 10$

$K_s$ $K_d$	0.0125	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
0.05	0.26	0.36	0.47	0.58	0.65	0.71
0.1	0.19	0.26	0.37	0.47	0.58	0.66
0.2	0.14	0.19	0.26	0.36	0.47	0.58
0.4	0.10	0.14	0.19	0.27	0.37	0.47

TAB. 2.5 – Ecart-type normalisé des luminances avec  $n = 0.1$  et  $L_s = 10$

La variation de  $ETN$  n'est pas très importante entre  $n = 0.1$  et  $n = 10$ , sachant que les deux valeurs prises pour  $n$  sont très contradictoires.  $n = 10$  représente un lobe spéculaire très étroit, tandis que  $n = 0.1$  représente un lobe très large.

La variation de  $ETN$  est infime lorsque le rapport  $\frac{K_s}{K_d}$  est petit : l'amplitude du lobe spéculaire (sa hauteur) est dérisoire comparée à la luminance émise dans les autres directions.  $ETN$  varie plus en fonction de  $n$  lorsque la surface est nettement spéculaire, mais dans ce cas, le type de surface est déjà déterminé (surface mixte).

La spécularité ou non de la surface est évaluée par estimation de la valeur de  $ETN$  :

- si  $ETN < 0.14$ , la surface est estimée parfaitement diffuse avec un rapport  $\frac{K_s}{K_d} < \frac{1}{16}$  quelles que soient les valeurs prises pour  $L_s$  et  $n$ ,
- si  $ETN > 0.29$ , la surface est estimée mixte (spéculaire et diffuse) avec un rapport  $\frac{K_s}{K_d} > \frac{1}{4}$  quelles que soient les valeurs prises pour  $L_s$  et  $n$ ,
- si  $0.14 \leq ETN \leq 0.29$ , aucune décision n'est prise sur la spécularité de la surface.

L'estimation, dans un premier temps, du type de surface permet de cibler les analyses à effectuer. Dans certains cas, un doute subsiste sur la spécularité de la surface : aucune décision probabiliste n'est prise, les quatre analyses sont effectuées puis l'évaluation de l'erreur des luminances permet la décision du bon résultat.

L'algorithme de détection est représenté sur la figure 2.28. Ainsi, cette détection permet de retrouver :

- le type de la source lumineuse présente lors de l'acquisition de l'objet (ponctuelle ou directionnelle),
- les coordonnées de la source lumineuse (position ou direction suivant le type de la source),

- la luminance  $L_s$  émise par la source à un facteur près (estimation de  $L_s K_d$ ),
- le coefficient diffus  $K_d$  de la surface de l'objet à un facteur près (estimation de  $L_s K_d$ ),
- le coefficient de spécularité  $K_s$  de la surface à un facteur près (toujours en fonction de  $L_s$ ) pour une surface mixte,
- l'exposant de réflexion spéculaire  $n$  de la surface pour une surface mixte.

```

- calculer l'écart-type normalisé des luminances  $ETN$ ,
- décider de la spécularité ou non de la surface en utilisant la valeur  $ETN$ ,
- si la surface est spéculaire, alors {
    - lancer l'analyse d'une source ponctuelle avec une surface spéculaire,
    - lancer l'analyse d'une source directionnelle avec une surface spéculaire,
    - évaluer l'erreur des luminances sur les deux analyses,
    - évaluer l'erreur des distances sur l'analyse d'une source ponctuelle
}
- sinon si la surface est diffuse, alors {
    - lancer l'analyse d'une source ponctuelle avec une surface diffuse,
    - lancer l'analyse d'une source directionnelle avec une surface diffuse,
    - évaluer l'erreur des luminances sur les deux analyses,
    - évaluer l'erreur des distances sur l'analyse d'une source ponctuelle
}
- sinon {
    /* aucune décision n'est prise sur la spécularité de la surface */
    - lancer les quatres analyses,
    - évaluer l'erreur des luminances sur les quatres analyses,
    - évaluer l'erreur des distances sur les deux analyses d'une source ponctuelle
}

- comparer l'erreur des luminances de chaque analyse effectuée,
/* l'analyse ayant l'erreur des luminances la plus faible représente le meilleur résultat */
/* et tous les paramètres de cette analyse sont récupérés :  $L_s K_d$ ,  $L_s K_s$  et  $n$  */
- si une source ponctuelle est détectée, alors {
    - le résultat est correct si et seulement si l'erreur des distances estimée est inférieure
      à un seuil fixé
}
- sinon {
    /* détection d'une source directionnelle */
    - le résultat est correct
}

```

FIG. 2.28 – Algorithme principal de détection d'une source lumineuse

## Chapitre 3

# Expérimentation

La programmation de la détection d'une source lumineuse est intégrée au sein du projet déjà existant sur la reconstruction d'un octree à partir d'un lumigraphe. Elle utilise les structures de données existantes (octree) afin d'extraire les caractéristiques de chaque voxel, et crée une structure complémentaire pour stocker les nouvelles données manipulées : ensemble des couples (direction de réflexion - luminance réfléchie) pour chaque voxel utilisé.

Pour effectuer les premiers tests, le programme utilise un octree entièrement recréé, indépendant de la phase de reconstruction géométrique. Dans un premier temps, cette simplification permet d'éviter les prétraitements coûteux en temps de calcul (construction de la géométrie à partir du lumigraphe, estimation de la normale de chaque voxel et classification des voxels selon les luminances émises).

### 3.1 Création d'un octree de tests

Le programme utilise les mêmes structures de données que celles déjà présentes dans le projet initial : un pointeur sur un octree représentant le noeud racine de l'octree et une variable stockant la profondeur de l'octree. D'autres données sont présentes dans le projet initial mais sont inutilisées dans l'analyse des sources de lumière.

L'octree est construit en n'insérant que des voxels ambigus : voxels représentant la surface de l'objet. La construction de l'octree est simplifiée puisqu'aucune insertion de voxels représentant l'intérieur ou l'extérieur de l'objet n'est effectuée (ces voxels ne sont pas utiles dans notre programme de détection de sources).

Lors de l'insertion d'un voxel dans l'octree, sa position et la direction de sa normale sont établies (ces caractéristiques sont également insérées dans l'octree).

Tous les voxels sont positionnés aléatoirement sur un disque, passant par l'origine du repère et orienté vers la direction de la source lumineuse (donnée en argument du programme). Le diamètre du disque peut être modifié afin d'obtenir une répartition différente. L'orientation de ce disque peut également varier d'un angle défini aléatoirement entre 0 et 45 degrés.

La normale de chaque voxel est également fixée aléatoirement, en respectant la contrainte de visibilité de la source par chaque voxel. En d'autres termes, la normale d'un voxel diffère de la direction d'incidence d'un angle inférieur à 90 degrés.

Ainsi, notre algorithme construit un octree représentant une surface plane ayant subi quelques modifications locales (variation de la normale entre deux voxels proches). A chaque exécution

du programme d'analyse, un nouvel octree est créé aléatoirement, en respectant les contraintes décrites ci-dessus.

### 3.2 Initialisation des données du programme

Dans le projet déjà existant l'octree, reconstruit à partir d'un lumigraphe, contient toute la surface de l'objet. Les propriétés photométriques ne sont pas homogènes sur toute la surface. Les voxels ambigus de l'octree sont classés selon ces caractéristiques puis, chaque ensemble de voxels représentant des voxels similaires doit être analysé pour détecter les sources lumineuses (voir section 2.1). Les ensembles de voxels sont analysés séparément pour en extraire les informations des sources (exécution du programme de détection de sources pour chaque ensemble de voxels).

L'octree créé dans la section 3.1 est considéré comme une partie de surface avec des propriétés photométriques uniformes. Par conséquent, tous les voxels ambigus de l'octree ont un comportement similaire, ils sont tous utilisés pendant l'analyse.

L'analyse utilise un ensemble de couples (luminance émise - direction de réflexion) pour chaque voxel. Ainsi une structure nommée *StrucVoxel* stockant toutes les données concernant un voxel est créée. Elle contient :

- un pointeur sur un noeud de l'octree, référençant les données relatives à ce voxel (position, normale),
- un tableau de 500 couples (direction - luminance), permettant de stocker des luminances émises par ce voxel dans des directions différentes.

L'analyse est limitée à l'utilisation de 500 luminances par voxel. Si un voxel possède plus de luminances, les luminances supplémentaires ne sont pas prises en compte par l'analyse. Ce nombre semble être un bon compromis. Les lumigraphes peuvent être représentés par 6 slabs *uvst*, chaque plan *uv* ayant une taille de  $16 * 16$ . Lorsque la résolution des images est de  $256 * 256$ , l'octree construit est généralement de profondeur 8, il peut contenir  $2^8 * 2^8 * 2^8$  voxels. Le nombre de voxels intersectés par un slab représente une face de l'octree (une face d'un cube), soit  $256 * 256$  voxels : pouvant être projetés sur un plan *st* (représentant une photographie) de même taille. Ainsi, la taille d'un voxel est assimilée à celle d'un pixel.

Le nombre de luminances réfléchies par un voxel est restreint sur 3 plans *uv* (représentant les directions de réflexions d'un voxel), soit au maximum  $16 * 16 * 3 = 768$  luminances.

L'analyse utilise, pour stocker chaque structure *StrucVoxel*, un tableau de taille 2000. Ainsi, si la classification des voxels, effectuée en amont, regroupe plus de 2000 voxels, seuls les 2000 premiers sont utilisés. Ce nombre permet de limiter le temps d'analyse, tout en utilisant un échantillonnage satisfaisant.

Un parcours de l'octree détermine chaque voxel représentant un élément de la surface stocké dans une nouvelle case du tableau de *StrucVoxel*. Pour chaque voxel stocké, des couples (direction - luminance) sont estimés puis ajoutés dans le tableau de (direction - luminance) de la structure *StrucVoxel*. Les directions de réflexion de chaque voxel sont choisies aléatoirement et les luminances émises sont calculées comme suit :

$$L_r(V_i, \vec{R}_j(V_i)) = L_s(K_d \cos \theta + K_s \cos^n \phi)$$

avec :

- $\vec{R}_j(V_i)$ , une direction de réflexion choisie aléatoirement pour le voxel  $V_i$ ,
- $L_s$ , la luminance émise par la source, fournie en argument du programme,

- $K_d$ ,  $K_s$  et  $n$ , les coefficients de la surface appliqués sur tous les voxels, également fournis en argument du programme,
- $\theta$ , l'angle d'incidence calculé par  $\cos \theta = \vec{T}(V_i) \cdot \vec{N}(V_i)$ ,
- $\phi$ , l'angle entre la direction de réflexion et la direction de réflexion maximale, calculé par  $\cos \phi = \vec{R}_j(V_i) \cdot \vec{R}_{max}(V_i)$ .

La structure de données est complète pour lancer la détection d'une source lumineuse.

### 3.3 Estimation de l'erreur des distances

Lors de la détection d'une source ponctuelle, la position estimée de la source n'est pas toujours correcte. Pour évaluer cette précision, nous proposons de déterminer l'erreur des distances entre la position estimée et chaque droite d'incidence (voir section 2.5.1).

La valeur de cette erreur des distances est un critère relatif pour décider la validité de la position estimée de la source, elle ne peut être utilisée directement. Cette erreur somme les distances entre la position estimée et chaque direction d'incidence mais ces distances dépendent de la répartition des voxels. Prenons deux exemples :

- les voxels sont répartis sur un disque de  $10m$  de diamètre et la source est estimée à  $5m$  de la surface de l'objet,
- les voxels sont répartis sur un disque de  $1m$  de diamètre et la source est estimée à  $0.5m$  de la surface de l'objet.

Si l'erreur des distances estimée dans le premier cas est 10 fois plus importante que dans le second, cela ne signifie pas que la position estimée est moins précise dans le premier cas : le premier exemple utilise des distances 10 fois plus importantes.

Par conséquent, pour évaluer la validité de la position estimée, le calcul de l'erreur des distances est divisé par le nombre de direction d'incidence (pour obtenir une erreur moyenne entre la position estimée et une droite d'incidence) et par la distance entre les deux voxels les plus éloignés l'un de l'autre (pour obtenir une erreur indépendante de la taille des objets utilisés).

### 3.4 Quelques résultats de la détection

Les tests suivants sont réalisés avec 350 voxels positionnés sur un disque de diamètre  $1m$ , centré en  $(0, 0, 0)$ .

#### Source ponctuelle - surface diffuse

Une série de tests est réalisée avec une surface parfaitement diffuse (le coefficient spéculaire  $K_s = 0$ ) puis avec une surface diffuse et très légèrement spéculaire : voir les tableaux 3.1 et 3.2 commentés ci-dessous.

<i>Position réelle S</i>	(0,0,1)	(0,0,2)	(0,0,4)	(0,0,9)	(0,0,9)	(0,0,100)
<i>Position estimée S</i>	(0,0,1)	(0,0,2)	(0,0,4)	(0,0,9)	dir(0,0,1)	dir(0,0,1)
<i><math>L_s K_d</math> estimé</i>	5	5	5	5	4.99	5
<i>Estimation jugée</i>	précise	précise	précise	précise	précise	précise

TAB. 3.1 – Résultats de la détection d'une source ponctuelle  $S$  émettant une luminance  $L_s = 10$ . La surface de l'objet est parfaitement diffuse ( $K_d = 0.5$ )

$Pos^o$ réelle $S$	(0,0,1)	(0,0,2)	(0,0,4)	(0,0,6)	(0,0,6)	(0,0,100)
$Pos^o$ estimée $S$	(0,0,1.01)	(0,0,1.91)	(0,0,3.61)	(0.01,0,4.75)	dir(0,0,1)	dir(0,0,1)
$L_s K_d$ estimé	5.06	5.06	5.06	5.06	5.05	5.05
Estimat <sup>o</sup> jugée	précise	précise	précise	imprécise	précise	précise

TAB. 3.2 – Résultats de la détection d’une source ponctuelle  $S$  émettant une luminance  $L_s = 10$ . La surface de l’objet est diffuse et très légèrement spéculaire ( $K_d = 0.5$ ,  $K_s = 0.01$ ,  $n = 1$ )

Les résultats montrent que la position de la source est estimée à la perfection dans le cas d’une surface parfaitement diffuse : la position estimée est identique à la position réelle de la source de lumière. L’utilisation d’un barycentre pour obtenir une meilleure direction d’incidence initiale est très efficace. Des tests devraient être effectués sur des géométries de surface différentes pour confirmer ces résultats.

Lorsque la surface est légèrement spéculaire, les résultats sont moins précis que précédemment. Ceci est principalement dû à une estimation imprécise de la luminance de chaque voxel. En effet, ces positions de source sont estimées avec l’analyse d’une surface diffuse i.e. pour laquelle la luminance réfléchie doit être la même dans toutes les directions de réflexion (ce n’est pas le cas dans les exemples du tableau 3.2).

L’algorithme ne peut détecter une source ponctuelle lorsque celle-ci est éloignée de l’objet. Au delà de  $9m$ , dans le cas d’une surface parfaitement diffuse, l’algorithme détecte une source directionnelle et non ponctuelle. Cette décision est réaliste, le programme est adapté au problème et détecte une source cohérente. D’ailleurs, pour ce type de surface, l’estimation de la position de la source est jugée correcte par l’algorithme (après évaluation de l’erreur des distances) et elle peut effectivement être considérée correcte (la direction d’incidence, lors de l’utilisation d’une source éloignée de l’objet, est également estimée correctement : cette estimation est représentée par la dernière ligne de chaque tableau).

Dans le cas d’une surface légèrement spéculaire, l’algorithme détecte une source directionnelle dès que la source est supérieure à  $6m$ . L’algorithme juge également si le résultat estimé est correct. Dans le cas de la détection d’une source à  $4m75$  au lieu de  $6m$  de la surface de l’objet, l’algorithme décide que le résultat n’est pas valide et il a entièrement raison.

L’estimation des caractéristiques autres que la position de la source est bien réalisée. Le produit  $L_s K_d$  (Luminance source \* Coefficient diffus) est toujours très bien estimé : la valeur réelle de  $L_s K_d$  est 5, l’imprécision de l’estimation est inférieure à 0.06.

### Source ponctuelle - surface mixte

Une série de tests est maintenant effectuée avec une surface mixte. Les résultats estimés sont répertoriés dans le tableau 3.3.

Les résultats obtenus dans le cas d’utilisation de surfaces mixtes sont moins précis que pour les surfaces diffuses. Lorsque la source est placée à plus de  $8m$  de l’objet, la source détectée est directionnelle : ce résultat est réaliste.

Toutes les caractéristiques de la source et de la surface sont estimées ( $L_s K_d$ ,  $L_s K_s$  et  $n$ ) avec précision.

<i>Pos° réelle S</i>	(0,0,1)	(0,0,2)	(0,0,4)	(0,0,6)	(0,0,8)	(0,0,100)
<i>Pos° estimée S</i>	(0,0,0.99)	(0,0,1.85)	(0,0,3.05)	(0,0,3.61)	dir(0,0,1)	dir(0,0,1)
<i>L<sub>s</sub>K<sub>d</sub> estimé</i>	5	5.01	5	5.01	5	5
<i>L<sub>s</sub>K<sub>s</sub> estimé</i>	3	3	3	2.99	3	3
<i>n estimé</i>	3	3	2.97	2.88	2.97	3
<i>Estimat° jugée</i>	précise	précise	imprécise	imprécise	précise	précise

TAB. 3.3 – Résultats de la détection d’une source ponctuelle  $S$  émettant une luminance  $L_s = 10$ . La surface de l’objet est mixte ( $K_d = 0.5$ ,  $K_s = 0.3$ , et  $n = 3$ )

L’algorithme estime une position de source ponctuelle trop imprécise quand elle est éloignée de  $4m$  à  $8m$  de la surface. Mais l’analyse est cohérente, le résultat est estimé imprécis par l’évaluation de l’erreur des distances.

Cette imprécision est liée au fait que chaque voxel dispose d’un ensemble *limité* de couples (direction - luminance). D’où une estimation imprécise de la direction d’incidence de chaque voxel, entraînant une imprécision dans l’estimation de la position de la source : voir figure 3.1.

Ainsi, l’imprécision est estimée en calculant le rapport  $r$  entre la distance séparant la position estimée de la surface et la distance entre les deux voxels les plus distants sur la surface. Dès que ce rapport est supérieur à  $\frac{1}{2}$ , l’imprécision existe et elle augmente en fonction de la croissance de ce rapport.

Dans le cas des tests réalisés précédemment, la surface représentée par les voxels est un disque de diamètre  $1m$ . Par conséquent, dès que la source lumineuse est éloignée de plus de  $0.5m$ , l’imprécision augmente. Ainsi, pour une source distante de la surface de plus de  $4m$ , le résultat de la détection de sa position reste imprécis malgré l’estimation d’un lobe spéculaire par voxel pour améliorer l’évaluation de la direction d’incidence.

### Source directionnelle

Une dernière série de tests est réalisée pour évaluer la détection d’une source directionnelle, quel que soit le type de surfaces : voir le tableau 3.4.

<i>Dir° réelle S</i>	(0,0,1)	(0.447,0.548,0.707)	(0.447,0.548,0.707)	(0.447,0.548,0.707)
<i>K<sub>d</sub> réel</i>	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>K<sub>s</sub> réel</i>			0.01	0.3
<i>n réel</i>			3	3
<i>Dir° estimée S</i>	(0,0,1)	(0.447,0.548,0.707)	(0.447,0.548,0.707)	(0.447,0.549,0.706)
<i>L<sub>s</sub>K<sub>d</sub> estimé</i>	5	5	5.06	5
<i>L<sub>s</sub>K<sub>s</sub> estimé</i>				3
<i>n estimé</i>				3
<i>Estimat° jugée</i>	précise	précise	précise	précise

TAB. 3.4 – Résultats de la détection d’une source directionnelle  $S$  émettant une luminance  $L_s = 10$ . Tous types de surface sont représentés dans ce tableau

Les quatres premières lignes du tableau représentent les caractéristiques réelles de la source et de la surface de l’objet. Les lignes suivantes correspondent aux résultats estimés par l’algorithme de détection.



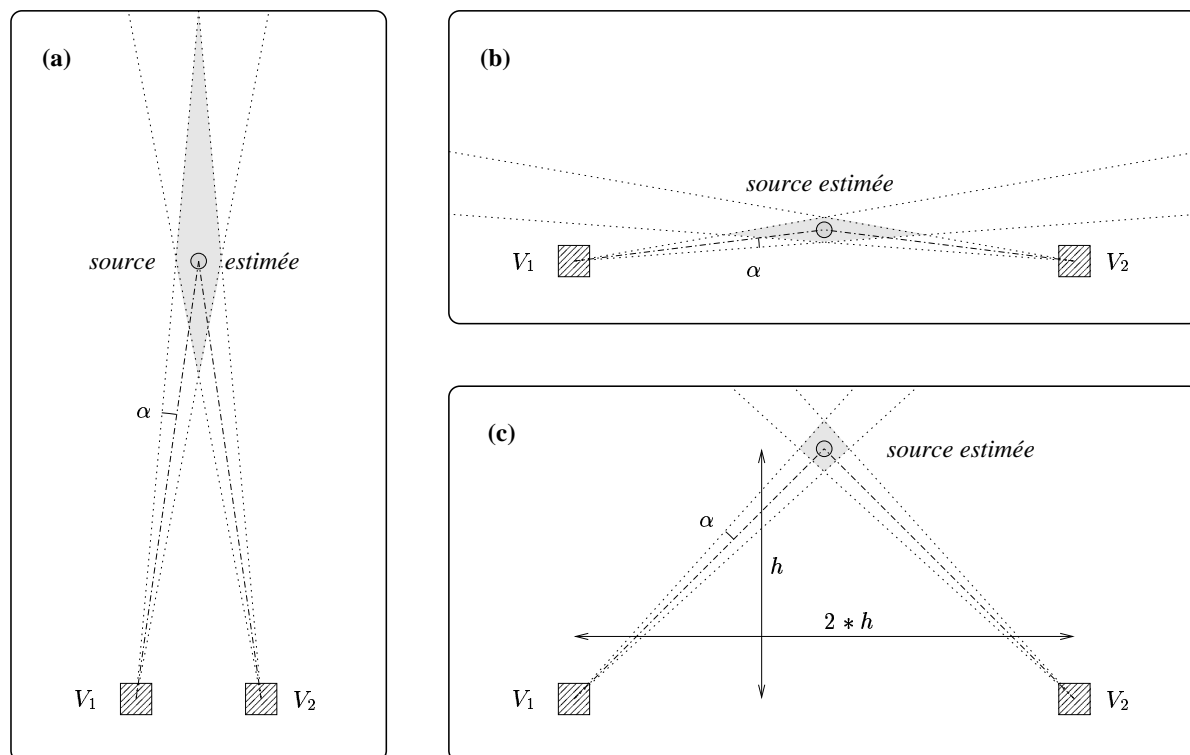


FIG. 3.1 – Imprécision de l'estimation d'une source ponctuelle. La figure (a) représente une source ponctuelle très éloignée par rapport aux deux voxels ( $V_1$  et  $V_2$ ) les plus distants sur la surface. L'angle de variation  $\alpha$  de la direction d'incidence estimée en chaque voxel entraîne une nette imprécision sur la position estimée de la source lumineuse. Sur la figure (b), la source lumineuse est très près de la surface de l'objet. Elle est trop près par rapport à la distance séparant les deux voxels les plus proches et entraîne également une imprécision de la position estimée de cette source. Cette situation n'est pas réaliste dans les systèmes d'acquisition de lumigraphes, car elle représente une source lumineuse placée dans la surface. La figure (c) représente le cas idéal où l'estimation de la source lumineuse est la plus précise. Sur cette figure, la distance séparant la source de la surface est égale à la demi-distance séparant les deux voxels les plus distants. L'estimation reste précise lorsque la source lumineuse est plus proche (des voxels plus rapprochés sont utilisés dans la détection de la source)

Dans ce tableau, les deux premières colonnes représentent des surfaces parfaitement diffuses donc aucune valeur n'est spécifiée pour les coefficients  $K_s$  et  $n$ . La troisième colonne représente une surface très légèrement spéculaire, elle est détectée par l'analyse d'une source directionnelle en présence de surfaces diffuses, d'où aucune estimation de  $L_s K_s$  et  $n$ .

Les résultats de la détection d'une source directionnelle sont très précis. La direction estimée de la source est identique à la direction réelle de la source lumineuse. Les caractéristiques de la source et de la surface sont également estimées avec précision : pour une valeur  $L_s K_d = 5$ , l'imprécision de l'estimation est inférieure à 0.06.

La prochaine étape correspond à l'utilisation, dans notre programme, de la reconstruction en voxels d'un lightfield. Ceci permet de vérifier la validité des résultats obtenus sur des lightfields synthétiques (où la position de la source lumineuse est clairement identifiée), mais elle n'a pu être réalisée pendant ce stage de DEA.



## Chapitre 4

# Perspectives, mise en oeuvre, discussion

Les premiers tests réalisés nous permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants pour la détection d'une source lumineuse. Les caractéristiques des surfaces sont estimées avec une grande précision, que ce soit pour  $L_s K_d$ ,  $L_s K_s$  ou  $n$ . La position de la source ponctuelle peut être estimée lorsque la source lumineuse est distante de moins de  $5m$  de la surface de l'objet, avec une surface inférieure à  $1m$  de diamètre. L'algorithme montre une capacité d'adaptation du résultat estimé à la situation présente. Il détecte une source directionnelle lorsque la source ponctuelle est trop éloignée de l'objet, ce résultat est très réaliste.

La prochaine étape consiste à effectuer des tests sur des lumigraphes complets pour lesquels la position de la source de lumière est connue. Cela permet l'estimation de la cohérence des caractéristiques retrouvées (utilisation de lightfields réels et non de modèles précalculés).

Nous aimerions pouvoir détecter plusieurs sources lumineuses, car le système actuel de détection est très restrictif : il fait l'hypothèse de lumigraphes acquis avec une seule source de lumière. L'acquisition de toute la surface d'un objet avec une seule source de lumière paraît irréaliste : une partie de la surface de l'objet n'est pas éclairée.

Seules deux types de sources lumineuses sont détectés dans le programme d'analyse actuel : les sources ponctuelle et directionnelle. La détection de sources surfaciques est une évolution intéressante, car les néons sont souvent représentés par ce type de source. Une source surfacique émet de la lumière depuis toute sa surface, ainsi elle est représentée par une infinité de points diffusant de la lumière. L'extraction d'une telle source peut être abordée en représentant la source par plusieurs sources ponctuelles.

La phase la plus intéressante concerne l'intégration de ces évolutions afin de détecter différents types de sources lumineuses présents simultanément. Cette perspective permet la détection de sources sur une variété de lumigraphes, provenant de systèmes d'acquisition différents.

L'extraction des caractéristiques des sources lumineuses est utile pour l'estimation de la fonction de réflectance bidirectionnelle (BRDF) de la surface de l'objet. Lors de la visualisation, cette BRDF est utilisée pour estimer l'illumination d'un lumigraphe intégré dans un environnement.

Mais l'estimation de BRDF à partir de lumigraphes sert également à construire une base de données répertoriant des BRDF de surfaces d'objets réels. Ainsi, ces BRDF peuvent être utilisées lors de visualisation d'environnements virtuels.



# Conclusion

Le rendu basé-image émerge de manière très active depuis quelques années. Ce domaine permet de visualiser des objets réels ou virtuels pour lesquels la description est exclusivement représentée par un ensemble d'images (appelés objets *basés-image*).

Le travail présenté dans ce rapport s'inscrit dans le contexte d'intégration de tels objets à l'intérieur d'environnements virtuels. La difficulté de ce problème concerne deux aspects. D'une part le positionnement de l'objet à l'intérieur de l'environnement. D'autre part l'éclairage de cet objet par des sources différentes de celles utilisées lors de l'acquisition des images.

Dans ce rapport, notre objectif est de déterminer conjointement (1) les caractéristiques géométriques et radiométriques de sources lumineuses à partir d'images et (2) les propriétés photométriques de la surface des objets. Le travail réalisé est la première étape de l'intégration, car elle produit les données nécessaires pour le ré-éclairage d'objets basés-image.

La structure utilisée au cours de ce stage est un lumigraphe (appelée également *lightfield*). Elle correspond à un échantillonnage du flux lumineux émis par un objet en chaque point de sa surface et dans toutes les directions. Notre travail s'appuie sur une reconstruction géométrique discrète de l'objet.

Les travaux réalisés permettent la détection d'une source lumineuse ponctuelle ou directionnelle, en utilisant diverses surfaces d'objets (diffuses, spéculaires ou mixtes). L'extraction d'une source ponctuelle est définie par l'estimation d'une direction d'incidence pour chaque voxel, puis par le calcul d'un point d'intersection de ces directions d'incidence en utilisant une matrice pseudo-inverse. L'estimation de la direction d'incidence d'un voxel représentant une surface spéculaire ou mixte utilise un algorithme d'identification des paramètres pour retrouver l'équation d'un lobe spéculaire pour chaque voxel. Les caractéristiques des sources (ponctuelle et directionnelle) sont retrouvées avec précision, ainsi que les propriétés photométriques des surfaces (diffuses, spéculaires et mixtes). L'utilisation de lumigraphes réels est la prochaine étape permettant de confirmer les premiers résultats obtenus.

De nombreuses hypothèses sont encore relativement contraignantes. Une seule source lumineuse est détectée dans un lumigraphe et l'extraction de plusieurs sources reste un problème à étudier. De plus, tous les types de sources ne sont pas pris en compte : la détection de sources surfaciques n'est pas abordée pendant ce stage. Enfin, l'extraction de plusieurs types de sources présents simultanément représente l'approche globale de la détection, une généralisation permettant la détection de sources dans tous les lightfields.

Les résultats obtenus au cours de ce stage sont encourageants et incitent à poursuivre cette voie de recherche.



# Bibliographie

- [1] E. H. Adelson and J. R. Bergen. *The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision*, chapter 1. Computational Models of Visual Processing, MIT Press, 1991.
- [2] R.T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4) :355–385, August 1997.
- [3] R.T. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. K. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6) :34–47, December 2001.
- [4] Michael Bajura, Henry Fuchs, and Ryutarou Ohbuchi. Merging virtual objects with the real world : Seeing ultrasound imagery within the patient. In ACM, editor, *SIGGRAPH'92*, pages 203–210. ACM, July 1992.
- [5] P. Beckmann and A. Spizzichino. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Artech House Inc, 1987.
- [6] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In James George, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '77)*, volume 11, pages 192–198. ACM, July 1977.
- [7] Stephen Brooks. Dynamic light fields. Master's thesis, Department of Computer Science, University of British Columbia, 1999.
- [8] Emilio Camahort, Apostolos Leros, and Donald Fussell. Uniformly sampled light fields. In G. Drettakis and N. Max, editors, *Rendering Techniques '98 (Proceedings of Eurographics Rendering Workshop '98)*, pages 117–130, New York, NY, 1998. Springer Wien.
- [9] Shenchang Eric Chen. Quicktime VR - an image-based approach to virtual environment navigation. In Robert Cook, editor, *SIGGRAPH 95 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 29–38. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1995. held in Los Angeles, California, 06-11 August 1995.
- [10] Shenchang Eric Chen and Lance Williams. View interpolation for image synthesis. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 279–288, August 1993.
- [11] Changching Chiu. Merging multiple light fields. Master's thesis, Dept of Computer Science, University of British Columbia, October 1998.
- [12] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1(1) :7–24, January 1982.
- [13] Brian Curless and Marc Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. *Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series) :303–312, August 1996.
- [14] Paul E. Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes : Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. *ACM Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :189–198, August 1998.
- [15] Paul E. Debevec and Jitendra Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *ACM Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :369–378, August 1997.



- [16] Paul E. Debevec, Camillo J. Taylor, and Jitendra Malik. Modeling and rendering architecture from photographs : A hybrid geometry- and image-based approach. *ACM Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series) :11–20, August 1996.
- [17] G. Drettakis, Eugene Fiume, and Alain Fournier. Tightly-coupled multiprocessing for a global illumination algorithm. In *Eurographics'90*, pages 387–98, Amsterdam, North-Holland, September 1990. Elsevier Science Publishers.
- [18] O. Faugeras, S. Laveau, L. Robert, G. Csurka, C. Zeller, C. Gauclin, and I. Zoghliami. 3d reconstruction of urban scenes from image sequences. *Journal of Computer Vision, Graphics and Image Processing : Image Understanding*, 69(3) :292–309, March 1998.
- [19] Alain Fournier. Illumination problems in computer graphics. In *Journée Analyse/Synthèse d'Images - JASI94*, 1994.
- [20] Dulce Poncelon Gavin Miller, Steven Rubin. Lazy decompression of surface light fields for precomputed global illumination. In *1998 Workshop on rendering*, 1998.
- [21] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski, and Michael F. Cohen. The lumi-graph. *ACM Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series) :43–54, August 1996.
- [22] N. Greene. Environment mapping and other applications of world projections. *IEEE Computer Graphics and Applications*, November 1986.
- [23] Erwan Guillou. *Simulation d'environnements complexes non lambertiens à partir d'images : application à la réalité augmentée*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2000.
- [24] Michael Halle. Multiple viewpoint rendering. In ACM, editor, *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '98)*, 1998.
- [25] Xiao D. He, Kenneth E. Torrance, Francois X. Sillion, and Donald P. Greenberg. A comprehensive physical model for light reflection. *ACM Computer Graphics*, 25(Annual Conference Series) :175–186, July 1991.
- [26] P. S. Heckbert. Fundamentals of texture mapping and image warping. Master's thesis, Dept of EECS, UCB, June 1989.
- [27] Tsai-Hong Hong and M. O. Shneier. Describing a robot's workspace using a sequence of views from a moving camera. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(6) :721–726, November 1985.
- [28] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchamp, Mark Halstead, Hubert Jin, John McDonald, Jean Schweitzer, and Werner Stuetzle. Piecewise smooth surface reconstruction. *ACM Computer Graphics*, 28(Annual Conference Series) :295–302, August 1994.
- [29] Hugues Hoppe, Tony DeRose, Tom Duchamp, John McDonald, and Werner Stuetzle. Surface reconstruction from unorganized points. *ACM Computer Graphics*, 26(Annual Conference Series) :71–78, August 1992.
- [30] Berthold K. P. Horn and Michael J. Brooks. *Shape from Shading*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1989. Prepared with Daniel Brotsky's  $\text{\LaTeX}$ .
- [31] Y. Sato I. Sato. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 5(1) :1–12, January 1999.
- [32] Katsushi Ikeuchi. Appearance modeling for mixed reality. In *Seventh IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, September 1998.
- [33] Sing Bing Kang. A survey of image-based rendering techniques. Technical report, Cambridge Research Laboratory, August 1997.
- [34] Sing Bing Kang and Huong Quynh Dynh. Multi-layered image-based rendering. In *Graphics Interface*, pages 98–106, 1999.
- [35] K.E.Torrance and E.M.Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surface. *Journal of Optical Society of America*, 57 :1105–1114, 1967.

- 
- [36] Eric Lafortune, Sing-Choog Foo, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :117–126, August 1997.
  - [37] Paul Lalonde and Alain Fournier. A wavelet representation of measured reflectance functions. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, 3(4) :329–336, December 1997.
  - [38] Robert C. Lansdale. Texture mapping and resampling for computer graphics. Master's thesis, Department of Electrical Engineering, University of Toronto, January 1991.
  - [39] Jed Lengyel and John Snyder. Rendering with coherent layers. *Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :233–242, 1997.
  - [40] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light Field Rendering. *Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series) :31–42, August 1996.
  - [41] R. R. Lewis and Alain Fournier. Light-driven global illumination with a wavelet representation of light transport. In *Seventh Eurographics Workshop on Rendering*, pages 12–21, June 1996.
  - [42] Andrew Lippman. Movie-maps : An application of the optical videodisc to computer graphics. In ACM, editor, *SIGGRAPH*, August 1980.
  - [43] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm. *ACM Computer Graphics*, 21(Annual Conference Series) :163–169, July 1987.
  - [44] W. N. Martin and J. K. Aggarwal. Volumetric descriptions of objects from multiple views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5(2) :150–158, March 1983.
  - [45] L. McMillan and G. Bishop. Plenoptic modeling : An image-based rendering system. *Computer Graphics*, 29(Annual Conference Series) :39–46, 1995.
  - [46] D. Meneveau, G. Subrenat, and A. Fournier. Reshading lightfield. Technical Report 2002-01, IRCOM-SIC, 2002.
  - [47] G. E. Miller, S. E. Offert, E. Chen, D. Patterson, S. Blacketter, S. A. Rubin, J. Yim, and J. Hanan. The virtual museum : Interactive 3d navigation of a multimedia database. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 3(3) :183–197, 1992.
  - [48] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg, and T. Limperis. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. Monograph 161, National Bureau of Standards (US), October 1977.
  - [49] Bui-T. Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6) :311–317, June 1975.
  - [50] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, and Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. ed. Cambridge, 1999.
  - [51] Paul Rademacher and Gary Bishop. Multiple-center-of-projection images. In ACM, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '98)*, 1998.
  - [52] C. Loscos & G. Drettakis & L. Robert. Interactive virtual relighting of real scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(4) :289–305, October 2000.
  - [53] Yoichi Sato, Mark D. Wheeler, and Katsushi Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation. *ACM Computer Graphics*, 31(Annual Conference Series) :379–388, August 1997.
  - [54] Steven M. Seitz and Charles R. Dyer. View morphing. In ACM, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '96)*, 1996.
  - [55] Jonathan Shade, Steven Gortler, Li wei He, and Richard Szeliski. Layered depth images. *ACM Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :231–242, August 1998.

- [56] John Snyder and Jed Lengyel. Visibility sorting and compositing without splitting for image layer decompositions. *ACM Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :219 – 230, 1998.
- [57] M. Soucy and D. Laurendeau. A general surface approach to the integration of a set of range views. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(4) :344–358, April 1995.
- [58] Richard Szeliski. Real-time octree generation from rotating objects. Technical report, Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Laboratory, One Kendall Square - Cambridge, Massachusetts 02139, December 1990.
- [59] Richard Szeliski. Rapid octree construction from image sequences. In 58, editor, *CVGIP : Image Understanding*, volume 1, pages 23–32, July 1993.
- [60] Richard Szeliski and Heung-Yeung Shum. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. In ACM, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '97)*, 1997.
- [61] Jay Torborg and James T. Kajiya. Talisman : Commodity realtime 3d graphics for the pc. *ACM Computer Graphics*, 30(Annual Conference Series) :353–363, August 1996.
- [62] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Polarization, directional distribution, and off-specular peak phenomena in light reflected from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 56(7), 1966.
- [63] Gregory J. Ward. Towards more practical reflectance measurements and models. In *Graphics Interface '92 Workshop on Local Illumination*, pages 15–21, May 1992.
- [64] T.T. Wong and C.W. Fu. Interactive relighting of panoramas. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(2) :32–41, 2001.
- [65] Daniel N. Wood, Adam Finkelstein, John F. Hugues, Craig E. Thayer, and David H. Salesin. Multiperspective panoramas for cel animation. In ACM, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '97)*, 1997.
- [66] Yizhou Yu and Jitendra Malik. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs. *ACM Computer Graphics*, 32(Annual Conference Series) :207–217, 1998.

## Résumé

Ces dernières années, le *rendu basé-image* devient attractif avec l'évolution permanente des capacités de stockage. Ce domaine permet la visualisation d'objets réels ou virtuels à partir d'images. Notre objectif, à plus long terme, est d'intégrer ces objets (appelés *objets basés-image*) à l'intérieur d'un environnement virtuel. La principale difficulté concerne l'éclairage des objets par les sources lumineuses de l'environnement, différentes de celles utilisées lors de l'acquisition des images. En effet la connaissance des sources de lumière initialement présentes est indispensable au ré-éclairage des objets.

Notre travail s'inscrit dans ce contexte d'intégration d'objets basés-image, il consiste à extraire les sources lumineuses utilisées pendant l'acquisition. Les structures manipulées au cours de ce stage, appelées *lumigraphes*, représentent des objets basés-image définis par un ensemble de photographies prises tout autour de chaque objet. Un algorithme de reconstruction en voxels est utilisé pour obtenir une géométrie de l'objet sous forme d'octree.

Au cours de ce stage de DEA, nous détectons la présence d'une source lumineuse (ponctuelle ou directionnelle) dans un lumigraphe et estimons sa luminance émise. Après l'estimation de la direction d'incidence pour chaque voxel, la position d'une source est évaluée par le calcul d'un point d'intersection de ces directions (utilisation de la méthode des pseudo-inverses). De plus, les propriétés photométriques des surfaces (diffuses, spéculaires et mixtes) sont estimées avec précision (utilisation d'un algorithme d'identification de paramètres).

**Mots clés :** Rendu basé-image – Lightfields – Reconstruction géométrique – Extraction de sources lumineuses – Estimation de propriétés photométriques.